Fundamentos de manufactura moderna

Tercera edición



Mikell P. Groover



Unidades estándar empleadas en este libro

A lo largo de este libro de texto se utilizan tanto las unidades del Sistema Internacional (SI, métrico), como las del Sistema Tradicional de Estados Unidos (USCS) en ecuaciones y tablas. Las unidades métricas se consideran como unidades primarias, y las unidades del USCS se dan entre paréntesis.

Prefijos para las unidades del SI

Prefijo	Símbolo	Multiplicador	Ejemplos de unidades (y sus símbolos)
nano-	n	10^{-9}	nanómetro (nm)
micro-	μ	10^{-6}	micrómetro (μm)
mili-	m	10^{-3}	milímetro (mm)
centi-	c	10^{-2}	centímetro (cm)
kilo-	k	10^{-3}	kilómetro (km)
mega-	M	10^{6}	megaPascal (MPa)
giga-	G	10^{9}	gigaPascal (GPa)

Tabla de equivalencias entre las unidades del SI y las del Sistema Tradicional de Estados Unidos (USCS)

Variable	Unidades del SI	Unidades del USCS	Equivalencias
Longitud	metro (m)	pulgada (in)	1.0 in = 25.4 mm = 0.0254 m
		pie (ft)	1.0 ft = 12.0 in = 0.3048 m = 304.8 mm
		yarda	1.0 yarda = 3.0 ft = 0.9144 m = 914.4 mm
		milla	1.0 milla = 5 280 ft = 1 609.34 m = 1.60934 km
		micro-pulgada (μ-in)	1.0 μ-in = 1.0×10^{-6} in = 25.4×10^{-3} μm
Área	m^2, mm^2	in^2, ft^3	1.0 in^2 = 645.16 mm^2
			1.0 ft^2 = 144 in^2 = 92.90×10^{-3} m^2
Volumen	m^3, mm^3	in^3, ft^3	1.0 in^3 = 16 387 mm^3
			1.0 ft^2 = 1 728 in^3 = 2.8317×10^{-2} m^3
Masa	kilogramo (kg)	libra (lb)	1.0 lb = 0.4536 kg
		tonelada	1.0 ton (corta) = 2 000 lb = 907.2 kg
Densidad	kg/m^3	lb/in^3	1.0 lb/in^3 = 27.68×10^3 kg/m^3
		lb/ft^3	1.0 lb/ft^3 = 16.0184 kg/m^3
Velocidad	m/min	ft/min	1.0 ft/min = 0.3048 m/min = 5.08×10^{-3} m/s
	m/s	in/min	1.0 in/min = 25.4 mm/min = 0.42333 mm/s
Aceleración	m/s^2	ft/seg^2	1.0 ft/seg = 0.3048 m/s^2
Fuerza	Newton (N)	libra (lb)	1.0 lb = 4.4482 N
Torque	N-m	ft-lb, in-lb	1.0 ft-lb = 12.0 in-lb = 1.356 N-m
			1.0 in-lb = 0.113 N-m
Presión	Pascal (Pa)	lb/in^2	1.0 lb/in^2 = 6 895 N/m^2 = 6 895 Pa
Carga	Pascal (Pa)	lb/in^2	1.0 lb/in^2 = 6.895×10^{-3} N/mm^2 = 6.895×10^{-3} MPa
Energía, trabajo	Joule (J)	ft-lb, in-lb	1.0 ft-lb = 1.365 N-m = 1.365 J
			1.0 in-lb = 0.113 N-m = 0.113 J
Energía térmica	Joule (J)	Unidad térmica británica (Btu)	1.0 Btu = 1 055 J
Potencia	Watt (W)	Caballo de fuerza (hp)	1.0 hp = 33 000 ft-lb/min = 745.7 J/s = 745.7 W
			1.0 ft-lb/min = 2.2597×10^{-2} J/s = 2.2597×10^{-2} W
Calor específico	J/Kg-°C	Btu/lb-°F	1.0 Btu/lb - °F = 1.0 calorías/g-°C = 4 187 J/kg-°C
Conductividad térmica	J/s-mm-°C	Btu/hr-in-°F	1.0 Btu/hr-in - °F = 2.077×10^{-2} J/s-mm-°C
Expansión térmica	(mm/mm)/°C	(in/in)/°F	1.0 (in/in)/ °F = 1.8 (mm/mm)/°C
Viscosidad	Pa-s	lb-seg/in^2	1.0 lb-seg/in^2 = 6 895 Pa-s = 6 895 N-s/m^2

Conversión entre las unidades del USCS y el SI

Para convertir del sistema USCS al SI: Para convertir el valor de una variable que esté en unidades de USCS a su equivalente en unidades del SI, ***multiplique*** el valor que desea convertir por el valor que aparece al lado derecho de la equivalencia correspondiente en la Tabla de equivalencias.

Ejemplo: Convierta una longitud $L = 3.25$ a su valor equivalente en milímetros.

Solución: La equivalencia que le corresponde es: 1.0 in = 25.4 mm

$$L = 3.25 \text{ in} \times (25.4 \text{ mm/in}) = \mathbf{82.55 \text{ mm}}$$

Para convertir unidades del SI al sistema USCS: Para convertir el valor de una variable de unidades del SI a su equivalente en unidades del USCS, ***divida*** el valor que desea convertir entre el valor asentado en el lado derecho de la equivalencia que le corresponde en la Tabla de equivalencias.

Ejemplo: Convierta un área $A = 1\,000 \text{ mm}^2$ a su equivalente en pulgadas cuadradas.

Solución: La equivalencia que le corresponde es: 1.0 in^2 = 645.16 mm^2

$$A = 1\,000 \text{ mm}^2 / (645.16 \text{ mm}^2/\text{in}^2) = \mathbf{1.55 \text{ in}^2}$$

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Materiales, procesos y sistemas

Tercera edición

Mikell P. Groover
Profesor de ingeniería industrial
y de sistemas
Lehigh University

Revisión técnica:

Ing. Antonio Barrientos Morales
Académico de Ingeniería Mecánica
Universidad Iberoamericana, Ciudad de México

Ing. Javier León Cárdenas
Jefe de Ingeniería Mecánica
Universidad La Salle, campus Ciudad de México

Ing. Rosendo Reyes Rosales
Coordinador de Talleres y Laboratorios de Ingeniería
Universidad La Salle, campus Ciudad de México



MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA
LISBOA • MADRID • NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • SAN LUIS • SIDNEY • TORONTO

Director Higher Education: Miguel Ángel Toledo Castellanos
Director editorial: Ricardo A. del Bosque Alayón
Editor sponsor: Pablo E. Roig Vázquez
Editora de desarrollo: Lorena Campa Rojas
Supervisor de producción: Zeferino García García

Traducción: Carlos Roberto Cordero Pedraza
Javier Enríquez Brito
Jesús Elmer Murrieta Murrieta

Diseño de portada: Círculodiseño

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA
Tercera edición



Edificio Punta Santa Fe
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A
Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe,
Delegación Álvaro Obregón
C.P. 01376, México, D. F.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

ISBN-13: 978-970-10-6240-1
ISBN-10: 970-10-6240-X

ISBN-10: 0-471-74485-9
ISBN-13: 978-0-471-74485-6

1234567890 0986543217

Impreso en México *Printed in Mexico*

PREFACIO

Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas está diseñado para un primer curso, o una serie de dos, de la materia de manufactura en los primeros años de los planes de estudio de las carreras de ingeniería mecánica, industrial y de manufactura. Dada su cobertura a los materiales de la ingeniería, también es apropiado para los cursos de ciencia e ingeniería de materiales que hacen énfasis en el procesamiento de materiales. Por último, es apropiado para programas de tecnología relacionados con las especialidades mencionadas de la ingeniería. La mayor parte del contenido del libro se relaciona con los procesos de manufactura (alrededor de 65% del texto), pero también da cobertura significativa a los materiales y sistemas de producción de la ingeniería. Los materiales, procesos y sistemas son los fundamentos básicos con los que se estructura la manufactura moderna, y en el libro se estudian esos tres grandes temas.

ENFOQUE

El objetivo del autor es tratar a la manufactura con un enfoque que es más ***moderno*** y ***cuantitativo*** que el de los libros de manufactura de otros autores. La afirmación de que es "moderno" se basa en que 1) cubre en forma más balanceada los materiales básicos de la ingeniería (metales, cerámicas, polímeros y materiales compuestos); 2) incluye procesos de manufactura desarrollados recientemente, además de los tradicionales que se han empleado y perfeccionado durante muchos años, y 3) su cobertura más completa de tecnologías de manufactura electrónica. Los libros de texto de otros autores tienden a hacer énfasis en los metales y su procesamiento, sin tomar mucho en cuenta los demás materiales de uso en la ingeniería cuyas aplicaciones y métodos de aprovechamiento han crecido en forma significativa en las últimas décadas. Por ejemplo, el volumen de polímeros que se comercian en el mundo de hoy, excede el de los metales procesados. Asimismo, otros libros cubren mínimamente la manufactura electrónica y sin embargo, la importancia comercial de los productos electrónicos y sus industrias asociadas se ha incrementado de manera sustancial durante las décadas más recientes.

La afirmación de que el libro es más "cuantitativo" que otros libros de texto de manufactura se basa en su énfasis en la ciencia de la manufactura y el gran uso que hace de ecuaciones y problemas cuantitativos (al final de cada capítulo). En el caso de ciertos procesos, fue el primer libro de procesos de manufactura que les dio un tratamiento cuantitativo de ingeniería.

LO NUEVO EN ESTA EDICIÓN

Esta tercera edición es una versión actualizada de la segunda, con un capítulo nuevo sobre procesos de fabricación con nanotecnología, y varias secciones actualizadas. El autor trata de ser exhaustivo en el contenido del libro, sin dejar que su tamaño sea excesivo. Entre los elementos clave de la edición nueva se incluyen los siguientes:

- Un capítulo nuevo sobre los procesos de fabricación con nanotecnología.
- Problemas de tarea nuevos y revisados, que en total suman 565. Casi todos requieren de un análisis cuantitativo.

- ➢ Preguntas de repaso nuevas y revisadas, así como cuestionarios de opción múltiple en todos los capítulos. Hay más de 740 preguntas de repaso al final de los capítulos y casi 500 de opción múltiple. Estas últimas se han reformulado para que sean más accesibles para el estudiante.
- ➢ En el libro se incluye un DVD para los profesores que así lo soliciten, que muestra videos de las acciones de muchos de los procesos de manufactura. Los capítulos se han actualizado para que incluyan referencias a ellos, y se han añadido preguntas al final de cada capítulo relacionadas con los videos.

Otros elementos clave

1. Secciones acerca de la ***Guía del procesamiento*** en cada uno de los cuatro capítulos sobre los materiales de ingeniería.
2. Secciones llamadas ***Consideraciones sobre el diseño del producto*** en muchos de los capítulos que tratan procesos de manufactura.
3. Hay ***Notas históricas*** en muchas de las tecnologías que se estudian.
4. Como en la segunda edición, en todo el libro se emplea el Sistema Internacional de Unidades (métrico), que más se usa en ingeniería, pero también se utiliza el Sistema de Unidades Tradicionales de Estados Unidos.

MATERIALES DE APOYO PARA LOS MAESTROS

Esta obra cuenta con interesantes complementos que fortalecen los procesos de enseñanza-aprendizaje, así como la evaluación de los mismos, los cuales se otorgan a profesores que adoptan este texto para sus cursos. Para obtener más información y conocer la política de entrega de estos materiales, contacte a su representante McGraw-Hill o envíe un correo electrónico a marketinghe@mcgraw-hill.com

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a las personas siguientes, que fungieron como revisores técnicos de conjuntos individuales de los capítulos de la primera edición: Iftikhar Ahmad (George Mason University), J. T. Black (Auburn University), David Bourell (University of Texas en Austin), Paul Cotnoir (Worcester Polytechnic Institute), Robert E. Eppich (American Foundryman's Society), Osama Eyeda (Virginia Polytechnic Institute and State University), Wolter Fabricky (Virginia Polytechnic Institute and State University), Keith Gardiner (Lehigh University), R. Heikes (Georgia Institute of Technology), Jay R. Geddes (San Jose State University), Ralph Jaccodine (Lehigh University), Steven Liang (Georgia Institute of Technology), Harlan MacDowell (Michigan State University), Joe Mize (Oklahoma State University), Colin Moodie (Purdue University), Michael Philpott (University of Illinois en Champaign-Urbana), Corrado Poli (University of Massachusetts en Amherst), Chell Roberts (Arizona State University), Anil Saigal (Tufts University), G. Sathyanarayanan (Lehigh University), Malur Srinivasan (Texas A&M University), A. Brent Strong (Brigham Young University), Yonglai Tian (George Mason University), Gregory L. Tonkay (Lehigh University), Chester Van Tyne (Colorado School of Mines), Robert Voigt (Pennsylvania State University) y Charles White (GMI Engineering and Management Institute).

Por sus revisiones valiosas de ciertos capítulos de la segunda edición, agradezco a John T. Berry (Mississippi State University), Rajiv Shivpuri (Ohio State University), James B. Taylor (North Carolina State University). Joel Troxler (Montana State University) y Ampere A. Tseng (Arizona State University).

Por sus consejos y estímulos provechosos para la tercera edición, doy gracias a varios de mis colegas en Lehigh, entre quienes se encuentran John Coulter, Keith Gardiner, Andrew Herzing, Wojciech Misiolek, Nicholas Odrey, Gregory Tonkay y Marvin White. En especial agradezco a Andrew Herzing del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, de Lehigh, por la revisión que hizo del capítulo nuevo sobre nanofabricación, así como a Greg Tonkay, de mi propio departamento, por desarrollar muchos de los problemas y preguntas nuevas y actualizadas en esta nueva edición.

Además, es apropiado dar crédito a todos los colegas que participaron con sus consejos en la preparación de esta tercera edición. Las preguntas o comentarios individuales se pueden dirigir personalmente al autor, en la dirección Mikell.Groover@Lehigh.edu

ACERCA DEL AUTOR

Mikell P. Groover es profesor de Ingeniería Industrial y de Sistemas en Lehigh University, donde también funge como Director del Laboratorio de Tecnología de Manufactura, George E. Kane y es miembro del cuerpo docente del Programa de Ingeniería de Sistemas de Manufactura. Obtuvo grados de B.A. en Ciencias y Artes (1961), B.S. en Ingeniería Mecánica (1962), M.S. en Ingeniería Industrial (1966) y Ph. D. (1969), todos en Lehigh. Es Ingeniero Profesional Registrado en Pennsylvania. Su experiencia industrial incluye varios años como ingeniero de manufactura en Eastman Kodak Company. Desde que ingresó a Lehigh ha efectuado trabajos de consultoría, investigación y proyectos para varias compañías industriales.

Sus áreas de investigación y enseñanza incluyen procesos de manufactura, sistemas de producción, automatización, manejo de materiales, planeación de instalaciones y sistemas de trabajo. Ha obtenido varios premios por su enseñanza en Lehigh University, así como el ***Albert G. Holzman Outstanding Educator Award***, del Institute of Industrial Engineers (1965) y el ***SME Education Award***, de la Society of Manufacturing Engineers (2001). Entre sus publicaciones están 75 artículos técnicos y siete libros (que se mencionan más adelante). Sus textos se emplean en todo el mundo y han sido traducidos al francés, alemán, español, portugués, ruso, japonés, coreano y chino. La primera edición del texto presente, ***Fundamentals of Modern Manufacturing***, recibió el ***IIE Joint Publishers Award*** (1996) y el ***M. Eugene Merchant Manufacturing Textbook Award***, de la Society of Manufacturing Engineers (1996).

El Dr. Groover es miembro del Institute of Industrial Engineers, American Society of Mechanical Engineers (ASME), la Society of Manufacturing Engineers (SME), el North American Manufacturing Research Institute (NAMRI) y ASM International. Es miembro del IIE (1987) y del SME (1996).

OTROS LIBROS DEL AUTOR

Automation, Production Systems, and Computer-Aided Manufacturing. Prentice Hall. 1980.

CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing. Prentice-Hall, 1984 (en colaboración con E. W. Zimmers, Jr.).

Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications. McGraw-Hill Book Company, 1986 (en colaboración con M. Weiss, R. Nagel y N. Odrey).

Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing. Prentice Hall, 1987.

Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, publicado originalmente por Prentice Hall en 1996, y después por John Wiley & Sons, Inc, en 1999.

Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing. Segunda edición, Prentice Hall, 2001.

Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. Segunda edición, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CONTENIDO

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

1 INTRODUCCIÓN Y PANORAMA DE LA MANUFACTURA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

La manufactura es importante en lo tecnológico, económico e histórico. La ***tecnología*** se define como la aplicación de la ciencia para proporcionar a la sociedad y a sus miembros aquellos objetos que necesitan o desean. La tecnología influye de muchas formas en nuestras vidas diarias, directa e indirectamente. Considere la lista de productos de la tabla 1.1. Representan distintas tecnologías que ayudan a los miembros de nuestra sociedad a vivir mejor. ¿Qué tienen en común esos productos? Todos son manufacturados. Esas maravillas tecnológicas no estarían disponibles para la sociedad si no pudieran manufacturarse. La manufactura es el factor esencial que hace posible a la tecnología.

En cuanto a la economía, la manufactura es un medio importante con el que una nación crea bienestar material. En Estados Unidos, las industrias manufactureras generan alrededor de 20% del producto interno bruto (PIB). Los recursos naturales de un país, como las tierras agrícolas, depósitos minerales y reservas petrolíferas, también crean bienestar.

TABLA 1.1 Productos que representan distintas tecnologías, la mayor parte de los cuales influyen a casi todas las personas.

- Automóvil deportivo utilitario (ADU) con tracción en las cuatro ruedas, bolsas de aire, frenos antibloqueo, control de manejo y radio AM-FM con reproductor de discos compactos
- Avión supersónico
- Bolígrafo
- Cajero automático
- Calculadora electrónica portátil
- Cámara digital
- Circuito integrado
- Computadora personal (PC)
- Disco compacto (CD)
- Disco de video digital (DVD)
- Disquete de alta densidad para PC
- Escáner óptico
- Foco incandescente
- Fotocopiadora
- Horno de microondas
- Impresora de inyección de tinta
- Juegos de video
- Latas de fácil apertura
- Lavadora de trastos
- Lavadora y secadora
- Lentes de contacto
- Máquina de fax
- Máquina para el diagnóstico médico por medio de imágenes de resonancia magnética (IRM)
- Podadora autopropulsada
- Raqueta de tenis de materiales compuestos
- Reloj de pulsera de cuarzo
- Reproductor de cintas de video
- Reproductor de discos compactos
- Reproductor digital de discos
- Robot industrial
- Silla de plástico para el jardín, moldeada en una pieza
- Sistema de seguridad para el hogar
- Teléfono celular
- Televisión a colores de pantalla grande
- Zapatos deportivos

En Estados Unidos, la agricultura, minería e industrias similares generan menos del 5% del PIB. La construcción y las empresas públicas producen algo más del 5%. Y el resto corresponde a industrias de servicios, entre las que se incluyen el menudeo, el transporte, la banca, las comunicaciones, la educación y el gobierno. El sector de los servicios agrupa el 70%, aproximadamente, del PIB de Estados Unidos. Tan sólo el gobierno de ese país genera tanto PIB como el sector de manufactura, pero los servicios gubernamentales no crean riqueza. En la economía moderna internacional, una nación debe poseer una base fuerte de manufactura (o tener recursos naturales significativos) si ha de contar con una economía fuerte y estándares de vida elevados para su pueblo.

Históricamente, por lo general se subestima la importancia de la manufactura en el desarrollo de la civilización. Pero a lo largo de la historia, las culturas humanas que han sido mejores para fabricar objetos han tenido más éxito. Al elaborar herramientas mejores, tuvieron destrezas y armas mejores. Las mejores destrezas les permitieron vivir mejor. Con armas mejores pudieron conquistar a las culturas vecinas en épocas de conflicto. En la Guerra Civil de Estados Unidos (1861-1865), una de las grandes ventajas del Norte sobre el Sur fue su fortaleza industrial, es decir, su capacidad de manufactura. En la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), Estados Unidos superó en producción a Alemania y Japón —ventaja decisiva para triunfar en la guerra. En gran parte, la historia de la civilización es la historia de la capacidad de la humanidad para fabricar cosas.

En este capítulo de apertura, se consideran temas generales sobre la manufactura. ¿Qué es la manufactura? ¿Cómo se organiza en la industria? ¿Cuáles son los materiales, procesos y sistemas con los que se logra la producción?

1.1 ¿QUÉ ES LA MANUFACTURA?

La palabra ***manufactura*** se deriva de las palabras latinas ***manus*** (mano) y ***factus*** (hacer); la combinación de ambas significa *hecho a mano*. La palabra *manufactura* tiene varios siglos de antigüedad, y “hecho a mano” describe en forma adecuada los métodos manuales que se utilizaban cuando se acuñó la expresión.[1] La mayor parte de la manufactura moderna se lleva a cabo por medio de maquinaria automatizada y controlada por computadora que se supervisa manualmente (véase la nota histórica 1.1).

1 Alrededor de 1567 d. C., apareció por primera vez la palabra ***manufactura*** como sustantivo, y hacia 1863 d. C., apareció como verbo.

Nota histórica 1.1 *Historia de la manufactura*

La historia de la manufactura puede dividirse en dos partes: 1) el descubrimiento y la invención por parte del hombre de los materiales y los procesos para fabricar cosas, y 2) el desarrollo de los sistemas de producción. Los materiales y procesos para hacer objetos preceden a los sistemas en varios milenios. Algunos de dichos procesos —fundición, trabajo con martillo (forjar), y rectificado— se remontan a 6 000 años o más. La fabricación temprana de implementos y armas se llevó a cabo más mediante destrezas y oficios, que mediante la manufactura en el sentido actual. Los antiguos romanos tenían lo que podrían llamarse "fábricas" para producir armas, pergaminos, cerámica y vidrio, así como otros productos de esa época, pero los procedimientos se basaban por mucho en el trabajo con las manos.

En este momento se examinarán los aspectos de los sistemas de manufactura, y los materiales y procesos se dejarán para la nota histórica 1.2. La expresión ***sistemas de manufactura*** se refiere a las formas de organizar a las personas y a los equipos de modo que la producción se lleve a cabo con más eficiencia. Son varios los sucesos históricos y descubrimientos que tuvieron un efecto grande en el desarrollo de los sistemas modernos de manufactura.

Es claro que un descubrimiento significativo fue el principio de la ***división del trabajo***, es decir, dividir el trabajo total en tareas, y hacer que los trabajadores individuales se convirtieran en especialistas en hacer solo una. Este principio se había practicado durante siglos, pero al economista Adam Smith (1723-1790) se le ha adjudicado el crédito por haber sido el primero en explicar su significado económico en su obra ***La riqueza de las naciones***.

La ***Revolución Industrial*** (alrededor de 1760 a 1830) tuvo en diversos modos un efecto grande sobre la producción. Marcó el cambio entre una economía basada en la agricultura y el oficio manual, a otra con base en la industria y la manufactura. El cambio comenzó en Inglaterra, donde se inventó una serie de máquinas y la potencia del vapor remplazó a la del agua, a la del viento y a la animal. Esas ventajas dieron a la industria británica la delantera sobre las de otras naciones, e Inglaterra trató de impedir la exportación de las tecnologías nuevas. Sin embargo, finalmente la revolución se extendió a otros países europeos y a Estados Unidos. Varios inventos de la revolución industrial contribuyeron mucho al desarrollo de la manufactura: 1) la ***máquina de vapor de Watt***, una tecnología nueva de generación de energía para la industria, 2) las ***máquinas herramienta***, que comenzaron con la perforadora de John Wilkinson, alrededor de 1775 (véase la nota histórica 22.1); 3) la ***hiladora con varios husillos, el telar mecánico***, y otras para la industria textil, que permitieron incrementos significativos de la productividad; y 4) el ***sistema fabril,*** forma nueva de organizar números grandes de trabajadores de la producción con base en la división del trabajo.

En tanto Inglaterra lideraba la revolución industrial, en Estados Unidos surgía un concepto importante: la manufactura de ***piezas intercambiables***. Se concede gran parte del crédito por este concepto a Eli Whitney (1765-1825), aunque su importancia ha sido reconocida a través de otros [6]. En 1797, Whitney negoció un contrato para producir 10 000 mosquetes para el gobierno de Estados Unidos. En esa época, la manera de fabricar armas era artesanal, fabricar cada pieza por separado para un arma en particular, y luego ajustarlas a mano. Cada mosquete era único, y el tiempo de fabricación era considerable. Whitney creía que los componentes podían hacerse con la exactitud suficiente para permitir su ensamblado sin ajustarlas. Después de varios años de desarrollo en su fábrica de Connecticut, en 1801 viajó a Washington para demostrar el principio. Puso los componentes de 10 mosquetes ante funcionarios gubernamentales, entre ellos Thomas Jefferson, y procedió a seleccionar piezas al azar para ensamblar las armas. No se requirió sensibilidad o ajuste especial, y todas las armas funcionaron a la perfección. El secreto detrás de su logro era el conjunto de máquinas, refacciones y medidores especiales que había perfeccionado en su fábrica. La manufactura de piezas intercambiables requirió muchos años de desarrollo antes de convertirse en una realidad práctica, pero revolucionó los métodos de manufactura y es un prerrequisito para la producción en masa. Debido a que su origen tuvo lugar en Estados Unidos, la producción de piezas intercambiables se conoció como el ***sistema americano*** de manufactura.

De su segunda mitad y hasta al final del siglo XIX se presenció la expansión de los ferrocarriles, barcos de vapor y otras máquinas que crearon la necesidad creciente de hierro y acero. Se crearon métodos nuevos de producción para satisfacer esa demanda (véase la nota histórica 6.1). Asimismo, durante ese periodo se inventaron varios productos de consumo, entre éstos: la máquina de coser, la bicicleta y el automóvil. A fin de satisfacer la demanda masiva de esos artículos, se requirieron métodos más eficientes de producción. Algunos historiadores identifican los desarrollos durante ese periodo como la ***Segunda Revolución Industrial***, que se caracterizó en términos de sus efectos sobre los sistemas de manufactura a través de lo siguiente: 1) producción en masa, 2) movimiento de la administración científica, 3) líneas de ensamblado, y 4) electrificación de las fábricas.

A finales del siglo XIX, surgió en Estados Unidos el movimiento de la ***administración científica***, en respuesta a la necesidad de planear y controlar las actividades de un número en aumento de trabajadores. Los líderes del movimiento incluían a Frederick W. Taylor (1856-1915), Frank Gilbreth (1868-1924) y su esposa Lilian (1878-1972). La administración científica tenía varias características [2]: 1) el ***estudio de movimientos***, motivado por descubrir el método mejor para ejecutar una tarea dada; 2) el ***estudio de tiempos***, para establecer estándares de trabajo para cierta labor; 3) el uso amplio de ***estándares*** en la industria; 4) el ***sistema de pago a destajo*** y otros planes similares de incentivos del trabajo; y 5) el uso de conjuntos de datos,

conservación de registros y contabilidad de costos en las operaciones fabriles.

Henry Ford (1863-1947) introdujo la ***línea de ensamblado*** en 1913, en su planta de Highland Park (véase la nota histórica 41.1). La línea de ensamblado hizo posible la producción en masa de productos de consumo complejos. Sus métodos permitieron a Ford vender un automóvil modelo T a un precio tan bajo como $500, lo que hizo que poseer un coche fuera algo factible para un segmento grande de la población estadounidense.

En 1881, se construyó en la ciudad de Nueva York la primera planta de generación de energía eléctrica, y pronto se utilizaron los motores eléctricos como fuente de energía para operar la maquinaria de las fábricas. Éste era un sistema que convenía más que las máquinas de vapor para distribuir energía, pues para llevarla a las máquinas se necesitaban bandas de transmisión. Alrededor de 1920, la electricidad había sustituido al vapor como la fuente principal de energía de las fábricas de Estados Unidos. El siglo xx fue la época en la que hubo más avances tecnológicos que en todos los siglos pasados juntos. Muchos de esos desarrollos dieron origen a la ***automatización*** de la manufactura.

1.1.1 Definición de manufactura

Como campo de estudio en el contexto moderno, la manufactura se puede definir de dos maneras: una tecnológica y la otra económica. En el sentido tecnológico, la ***manufactura*** es la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material de inicio dado para fabricar piezas o productos; la manufactura también incluye el ensamble de piezas múltiples para fabricar productos. Los procesos para llevar a cabo la manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual, como se ilustra en la figura 1.1*a*). Casi siempre, la manufactura se ejecuta como una secuencia de operaciones. Cada una de éstas lleva al material más cerca del estado final que se desea.

En el sentido económico, la ***manufactura*** es la transformación de los materiales en artículos de valor mayor por medio de uno o más operaciones de procesamiento o ensamblado, según lo ilustra la figura 1.1*b*). La clave es que la manufactura ***agrega valor*** al material cambiando su forma o propiedades, o mediante combinar materiales distintos también alterados. El material se habrá hecho más valioso por medio de las operaciones de manufactura ejecutadas en él. Cuando el mineral de hierro se convierte en acero se le agrega valor. Si la arena se transforma en vidrio se le añade valor. Cuando el petróleo se refina y se convierte en plástico su valor aumenta. Y cuando el plástico se modela en la geometría compleja de una silla de jardín, se vuelve más valioso.

Es frecuente que las palabras manufactura y producción se usen en forma indistinta. El punto de vista del autor es que la producción tiene un significado más amplio que la manufactura. Para ilustrar esto, se puede utilizar la expresión "producción de petróleo crudo", pero la frase "manufactura de petróleo crudo" parece fuera de lugar. Sin embargo,

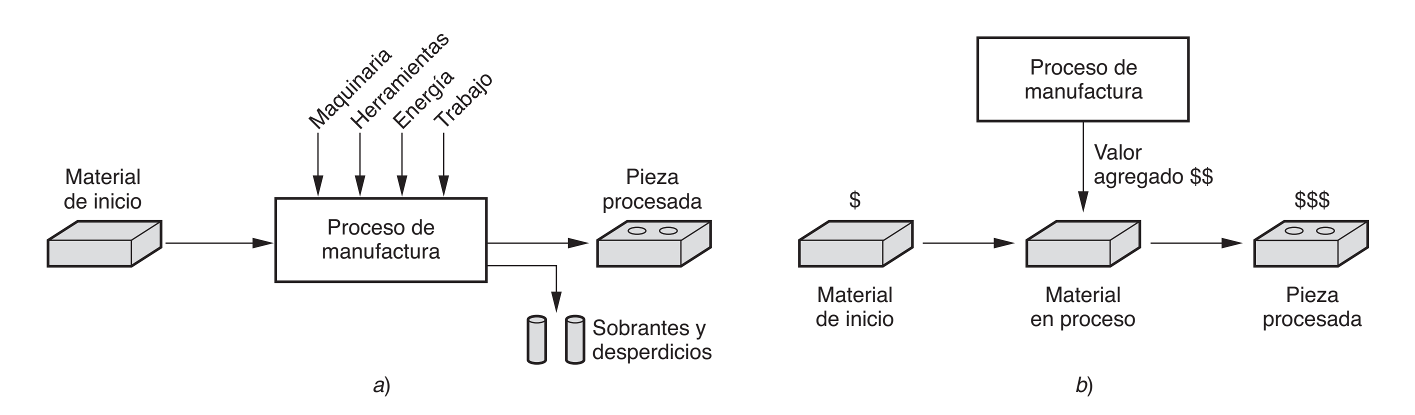


FIGURA 1.1 Dos maneras de definir manufactura: *a*) como proceso técnico, y *b*) como proceso económico.

cuando se emplea en el contexto de productos tales como piezas metálicas o automóviles, cualquiera de ambas palabras es aceptable.

1.1.2 Las industrias manufactureras y sus productos

La manufactura es una actividad importante, pero no se lleva a cabo sólo por sí misma. Se ejecuta como una actividad comercial de las compañías que venden productos a los clientes. El tipo de manufactura que una empresa realiza depende de la clase de producto que fabrica. Esta relación se va a analizar primero con el examen de los tipos de industrias manufactureras, y después con la identificación de los productos que generan.

Industrias manufactureras La industria consiste en empresas y organizaciones que producen o suministran bienes y servicios. Las industrias se clasifican como primarias, secundarias o terciarias. Las ***industrias primarias*** cultivan y explotan recursos naturales, tales como la agricultura y minería. Las ***industrias secundarias*** toman las salidas de las primarias y las convierten en bienes de consumo y capital. En esta categoría, la manufactura es la actividad principal, pero también quedan incluidas las construcciones y la generación de energía. Las ***industrias terciarias*** constituyen el sector de servicios de la economía. En la tabla 1.2 se presenta una lista de industrias específicas de dichas categorías.

Este libro se dedica a las industrias secundarias de la tabla 1.2, que incluyen las compañías que se dedican a la manufactura. Sin embargo, la Clasificación Internacional Estándar de Industrias, que se empleó para compilar la tabla 1.2, incluye varias industrias cuyas tecnologías de producción no se estudian en este texto; por ejemplo, las bebidas, los productos químicos y los alimentos procesados. En el libro, manufactura significa producción de ***hardware***, que va desde tuercas y tornillos hasta computadoras digitales y armas. Se incluyen productos plásticos y cerámicos, pero se excluyen la ropa, las bebidas, los productos químicos, la comida y el software. En la tabla 1.3 se presenta nuestra lista corta de industrias manufactureras.

Productos manufacturados Los productos finales fabricados por las industrias que se enlistan en la tabla 1.3 se dividen en dos clases principales: bienes de consumo y bienes de capital. Los ***bienes de consumo*** son productos que los consumidores compran en forma directa, como autos, computadoras personales, televisiones, neumáticos y raquetas de tenis, entre muchos otros más. Los ***bienes de capital*** son aquellos que adquieren otras compañías para producir bienes y prestar servicios. Algunos ejemplos de bienes de capital incluyen aviones, computadoras grandes, equipo ferroviario, máquinas herramienta y equipo para la construcción.

TABLA 1.2 Industrias específicas de las categorías primaria, secundaria y terciaria.

Primaria	Secundaria		Terciaria (servicios)	
Agricultura	Aerospacial	Maquinaria pesada	Banca	Legales
Canteras	Alimentos procesados	Materiales para construcción	Bienes raíces	Reparaciones y mantenimiento
Forestal	Aparatos de consumo	Metales procesados	Comercio al mayoreo	Restaurantes
Ganadería	Automotriz	Metalurgia básica	Comercio al menudeo	Salud y cuidados médicos
Minería	Bebidas	Neumáticos y caucho	Comunicaciones	Seguros
Pesca	Computadoras	Papel	Educación	Servicios financieros
Petróleo	Construcción	Plásticos (formados)	Entretenimiento	Transporte
	Editorial	Productos químicos	Gobierno	Turismo
	Electrónica	Refinación de petróleo	Hotel	
	Equipos	Textiles	Información	
	Farmacéutica	Vestido		
	Instalaciones de generación de energía	Vidrio, cerámicos		
	Madera y muebles			

TABLA 1.3 Industrias de manufactura cuyos materiales, procesos y sistemas se estudian en este libro.

Industria	Productos típicos	Industria	Productos típicos
Aerospacial	Aviones comerciales y militares	Equipos	Maquinaria industrial, equipo ferroviario
Automotriz	Autos, camiones, autobuses, motocicletas	Metales procesados	Piezas maquinadas, acuñación, herramientas
Metalurgia básica	Hierro, acero, aluminio, cobre, etc.	Vidrio, cerámicos	Productos de vidrio, herramientas cerámicos, vajillas
Computación	Computadoras grandes y personales	Maquinaria pesada	Máquinas herramientas, construcción de equipos
Aparatos de consumo	Aparatos domésticos grandes y pequeños	Plásticos (formados)	Plásticos moldeados, extrusiones de plástico
Electrónica	Equipo de audio, televisiones, reproductoras de video	Neumáticos y caucho	Llantas, suelas de calzado, pelotas de tenis

Además de los productos finales, otros artículos manufacturados incluyen los ***materiales, componentes*** y ***suministros*** que emplean las compañías para fabricar los artículos terminados. Algunos ejemplos de ellos incluyen la lámina de acero, barras de acero, acuñación, piezas maquinadas, plásticos moldeados y extrusiones, herramientas de corte, troqueles, moldes y lubricantes. Así, las industrias manufactureras son una infraestructura compleja con categorías y niveles distintos de proveedores intermedios con quienes el consumidor final nunca tratará.

Este libro por lo general estudia ***artículos discretos*** —piezas individuales y productos ensamblados— en lugar de aquellos producidos por ***procesos continuos***. Un estampado metálico es un producto discreto, pero el rollo de metal laminado del que se fabrica es continuo o semicontinuo. Muchas piezas discretas comienzan como productos continuos o semicontinuos, tales como las extrusiones o el cable eléctrico. Secciones grandes de longitudes casi continuas se cortan al tamaño que se desea. Una refinería de petróleo es un ejemplo aún mejor del proceso continuo.

Cantidad de producción y variedad de productos La cantidad de productos elaborados por una fábrica tiene una influencia importante en la manera en que están organizados su personal, sus instalaciones y sus procedimientos. Las cantidades de producción anual se clasifican en tres categorías: 1) producción ***baja***, en el rango de 1 a 100 unidades por año; 2) producción ***media***, de 100 a 10 000 unidades anuales; y 3) producción ***alta***, de 10 000 a varios millones de unidades. Los límites de los tres rangos son algo arbitrarias (son a juicio del autor). En función de las clases de productos pueden cambiar su orden de magnitud.

La cantidad de producción se refiere al número de unidades de cierto tipo de producto que se producen en un año. Algunas plantas producen una variedad de productos distintos, cada uno de los cuales se hace en cantidades bajas o medias. Otras plantas se especializan en la producción alta de un solo tipo de producto. Es instructivo identificar la variedad de productos como parámetro distintivo de la cantidad de producción. La variedad de productos se refiere a los diseños o tipos distintos de productos que se producen en la planta. Productos diferentes tienen formas y tamaños diferentes; desempeñan funciones distintas; se destinan a mercados distintos; algunos tienen más componentes que otros; y así sucesivamente. Es posible contar el número de tipos distintos de productos fabricados cada año. Cuando el número de tipos de productos de la fábrica es elevado, eso indica una variedad de productos alta.

Existe una correlación inversa entre la variedad de productos y la cantidad de producción, en términos de las operaciones de la fábrica. Si la variedad de los productos de una fábrica es elevada, entonces es probable que su cantidad de producción sea baja; pero si la cantidad de producción es alta, entonces la variedad de productos será baja, como se ilustra con la banda diagonal en la figura 1.2.

Aunque se ha identificado la variedad de productos como un parámetro cuantitativo (número de tipos diferentes de productos que hace la planta o la compañía), éste es mucho menos exacto que la cantidad de producción ya que los detalles en que difieren los diseños

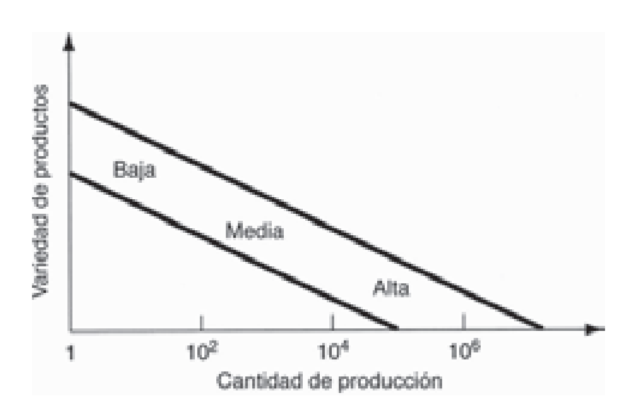


FIGURA 1.2 Relación entre la variedad de productos y la cantidad de producción en la manufactura de productos discretos.

no se capturan sólo con el número de diseños distintos. Las diferencias entre un automóvil y un acondicionador de aire son mucho mayores que entre este último y una bomba de calor. Y dentro de cada tipo de producto existen diferencias entre modelos específicos.

El grado de las diferencias del producto puede ser pequeño o grande, como se manifiesta en la industria automotriz. Cada una de las compañías automotrices de Estados Unidos. produce dos o tres modelos de automóvil distintos en la misma planta de ensamblado, aunque los estilos de la carrocería y otras características del diseño son virtualmente las mismas. En plantas distintas, la compañía construye camiones pesados. Para describir dichas diferencias de la variedad de productos, se utilizan los términos "suave" y "dura". La ***variedad suave de productos*** ocurre cuando sólo existen diferencias pequeñas en la variedad de productos, como aquellas entre autos fabricados en la misma línea de producción. En un producto ensamblado, la variedad de productos se caracteriza por una proporción elevada de piezas comunes entre los modelos. La ***variedad dura de productos*** sucede cuando éstos varían en forma sustancial, y hay pocas piezas en común, o ninguna. La diferencia entre un automóvil y un camión es dura.

1.1.3 Capacidad de manufactura

Una planta de manufactura consiste en un conjunto de ***procesos*** y ***sistemas*** (y personas, por supuesto) diseñados para transformar cierto rango limitado de ***materiales*** en productos de valor incrementado. Esos tres bloques constitutivos —materiales, procesos y sistemas— integran la materia de la manufactura moderna. Entre esos factores existe una interdependencia fuerte. Una compañía manufacturera no puede hacer todo. Sólo debe hacer ciertas cosas y hacerlas bien. La ***capacidad de manufactura*** se refiere a las limitaciones técnicas y físicas de una empresa de manufactura y cada una de sus plantas. Es posible identificar varias dimensiones de dicha capacidad: 1) capacidad tecnológica de proceso, 2) tamaño físico y peso del producto, y 3) capacidad de producción.

Capacidad tecnológica de proceso La ***capacidad tecnológica de proceso*** de una planta (o compañía) es el conjunto de procesos de manufactura con que dispone. Ciertas plantas realizan operaciones de maquinado, otras convierten lingotes de acero en lámina, y unas más construyen automóviles. Una planta de maquinado no puede laminar acero, y una planta de laminación no puede fabricar autos. La característica subyacente que distingue a esas plantas son los procesos que pueden ejecutar. La capacidad de procesamiento tecnológico se relaciona de cerca con el tipo de material. Ciertos procesos de manufactura se ajustan a ciertos materiales, mientras que otros se adaptan a unos distintos. Al especializarse en determinado proceso o grupo de procesos, la planta se especializa en forma simultánea en ciertos tipos de materiales. Las capacidades tecnológicas de proceso incluyen no sólo los procesos físicos, sino también la experiencia que tiene el personal de la planta en dichas tecnologías. Las compañías deben concentrarse en el diseño y la manufactura de productos que son compatibles con su capacidad tecnológica de proceso.

Limitaciones físicas del producto Un segundo aspecto de la capacidad de manufactura lo impone el ***producto físico***. Una planta con un conjunto dado de procesos está limitada en los términos del tamaño y el peso de los productos que pueden alojarse. Los productos grandes y pesados son difíciles de mover. Para hacerlo, la planta debe equiparse con grúas con la capacidad de carga requerida. Piezas y productos pequeños que se fabrican en cantidades grandes se trasladan por medio de bandas u otros medios. La limitante del tamaño y peso de un producto también se extiende a la capacidad física del equipo de manufactura. Las máquinas de producción tienen tamaños distintos. Las más grandes deben utilizarse para procesar piezas grandes. El conjunto del equipo de producción, manejo de materiales, capacidad de almacenamiento y tamaño de planta, debe planearse para los productos que están dentro de cierto rango de tamaño y peso.

Capacidad de producción Una tercera limitante de la capacidad de una planta de manufactura, es la cantidad de producción que puede obtenerse en un periodo de tiempo dado (por ejemplo, mes o año). Es común llamar a dicha limitante de cantidad ***capacidad de planta***, o ***capacidad de producción***, y se define como la tasa máxima de producción que una planta puede alcanzar en condiciones dadas de operación. Estas condiciones se refieren al número de turnos por semana, horas por turno, niveles de la mano de obra directa, entre otros. Esos factores representan entradas de la planta. Dadas estas entradas, ¿cuál es la salida que puede generar la empresa?

Por lo general, la capacidad de planta se mide en términos de las unidades producidas, tales como las toneladas de acero que produce al año una fundición, o el número de automóviles producido por una planta de ensamblado final. En estos casos, las producciones son homogéneas. En los casos en que las unidades de producción no son homogéneas, otros factores más apropiados de medición, son las horas hombre de capacidad productiva en un taller de maquinado que produce piezas varias.

Los materiales, procesos y sistemas son los bloques constitutivos básicos de la manufactura, y las tres amplias áreas temáticas de este libro. A continuación se dará un panorama de dichos temas.

1.2 LOS MATERIALES EN LA MANUFACTURA

La mayor parte de los materiales para ingeniería se clasifican en una de tres categorías básicas: 1) ***metales***, 2) ***cerámicos*** y 3) ***polímeros***. Sus características químicas son diferentes, sus propiedades mecánicas y físicas no se parecen y afectan los procesos de manufactura susceptibles de emplearse para obtener productos de ellos. Además de las tres categorías básicas, hay 4) ***compuestos*** —mezclas no homogéneas de los otros tres tipos fundamentales. La relación entre los cuatro grupos se ilustra en la figura 1.3. En esta sección se revisa a dichos materiales. En los capítulos 6 a 9, se estudian con más detalle los cuatro tipos de material.

1.2.1 Metales

Los metales que se emplean en la manufactura, por lo general son ***aleaciones***, que están compuestos de dos o más elementos, con al menos uno en forma metálica. Los metales se dividen en dos grupos básicos: 1) ferrosos y 2) no ferrosos.

Metales ferrosos Los ***metales ferrosos*** se basan en el hierro: el grupo incluye acero y hierro colado. Dichos metales constituyen el grupo comercial más importante, más de las tres cuartas partes del peso total de los metales de todo el mundo. El hierro puro tiene un uso comercial limitado, pero cuando se mezcla con carbono tiene más usos y mayor valor



FIGURA 1.3 Diagrama de Venn que muestra los tres tipos de materiales básicos más los compuestos.

comercial que cualquier otro metal. Las aleaciones de hierro y carbono forman acero y hierro colado.

El ***acero*** se define como una aleación de hierro-carbono que contiene 0.02%-2.11% de carbono. Es la categoría más importante dentro del grupo de metales ferrosos. Es frecuente que su composición incluya otros elementos de la aleación, tales como manganeso, cromo, níquel y molibdeno, para mejorar las propiedades del metal. Las aplicaciones del acero incluyen la construcción (por ejemplo: puentes, vigas tipo I, y clavos), transporte (camiones, rieles y equipo rodante para vía férrea), y productos de consumo (automóviles y aparatos).

El ***hierro colado*** es una aleación de fierro y carbono (2%-4%) que se utiliza en el moldeado (sobre todo en el moldeado en arena verde). El silicio también está presente en la aleación (en cantidades que van de 0.5% a 3%), y es frecuente que también se agreguen otros elementos para obtener propiedades deseables en el elemento fundido. El hierro colado se encuentra disponible en distintas formas, de las que la más común es el hierro colado gris; sus aplicaciones incluyen bloques y cabezas para motores de combustión interna.

Metales no ferrosos Los metales no ferrosos incluyen los demás elementos metálicos y sus aleaciones. En casi todos los casos, las aleaciones tienen más importancia comercial que los metales puros. Los metales no ferrosos incluyen los metales puros y aleaciones de aluminio, cobre, oro, magnesio, níquel, plata, estaño, titanio, zinc y otros metales.

1.2.2 Cerámicos

Un **cerámico** se define como un compuesto que contiene elementos metálicos (o semimetálicos) y no metálicos. Los elementos no metálicos comunes son oxígeno, nitrógeno y carbono. Los cerámicos incluyen una variedad de materiales tradicionales y modernos. Los productos cerámicos tradicionales, algunos de los cuales se han utilizado durante miles de años, incluyen: ***arcilla*** (se dispone de ella en abundancia, consiste en partículas finas de silicatos de aluminio hidratados y otros minerales que se utilizan en la fabricación de ladrillos, baldosas y vajillas); ***sílice*** (es la base para casi todos los productos de vidrio); y ***alúmina*** y ***carburo de silicón*** (dos materiales abrasivos que se emplean en el rectificado). Los cerámicos modernos incluyen algunos de los materiales anteriores, tales como la ***alúmina***, cuyas propiedades se mejoran en varios modos a través de métodos modernos de procesamiento. Los más nuevos incluyen ***carburos*** —los carburos metálicos tales como el carburo de tungsteno y el de titanio, se emplean mucho como materiales para herramientas de corte—, y los ***nitruros*** —los nitruros metálicos y semimetálicos como el nitruro de titanio y el de boro, se utilizan como herramientas de corte y abrasivos para rectificar.

Con fines de procesamiento, los cerámicos se dividen en 1) cerámicos cristalinos y 2) vidrios. Para cada tipo se requieren diferentes métodos de manufactura. Los cerámicos cristalinos se forman de distintos modos a partir de polvos que después se calientan (a una temperatura inferior del punto de fusión a fin de lograr la unión entre los polvos). Los cerámicos vidriados (vidrio, sobre todo) se mezclan y funden para después formarse en procesos tales como el vidrio soplado tradicional.

1.2.3 Polímeros

Un ***polímero*** es un compuesto formado por unidades estructurales repetidas denominadas ***meros***, cuyos átomos comparten electrones que forman moléculas muy grandes. Por lo general, los polímeros consisten en carbono más uno o más elementos tales como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cloro. Los polímeros se dividen en tres categorías: 1) polímeros termoplásticos o termovariables, 2) polímeros termoestables o termofijos, y 3) elastómeros.

Los ***polímeros termoplásticos*** pueden sujetarse a ciclos múltiples de calentamiento y enfriamiento sin que se altere en forma sustancial la estructura molecular del polímero. Los termoplásticos comunes incluyen polietileno, poliestireno, cloruro de polivinilo y nailon. Los ***polímeros termoestables*** sufren una transformación química (curado) hacia una estructura rígida después de haberse enfriado a partir de una condición plástica calentada; de ahí el nombre de "termoestables". Los miembros de este tipo incluyen los fenoles, resinas amino y epóxicas. Aunque se emplea el nombre "termoestable", algunos de dichos polímeros se curan por medio de mecanismos distintos del calentamiento. Los ***elastómeros*** son polímeros que muestran un comportamiento muy elástico; de ahí el nombre de elastómeros. Incluyen el caucho natural, neopreno, silicón y poliuretano.

1.2.4 Compuestos

Los compuestos no constituyen en realidad una categoría separada de materiales; son mezclas de los otros tres tipos. Un ***compuesto*** es un material que consiste en dos o más fases que se procesan por separado y luego se unen para lograr propiedades superiores a las de sus constituyentes. El término ***fase*** se refiere a una masa homogénea de material, tal como la agregación de granos de estructura celular idéntica y unitaria en un metal sólido. La estructura usual de un compuesto consiste en partículas o fibras de una fase mezclada en una segunda que se llama la ***matriz***.

Los compuestos se encuentran en la naturaleza (por ejemplo, madera), y se pueden producir en forma sintética. El tipo sintetizado es de mayor interés aquí, e incluye fibras de vidrio en una matriz de polímero, por ejemplo fibra reforzada de plástico; fibras de polímero de un tipo en una matriz de un segundo polímero, tal como un compuesto epóxico de Kevlar; y un cerámico en una matriz metálica, tal como carburo de tungsteno en una sustancia aglutinante de cobalto para formar una herramienta de corte a base de carburo cementado.

Las propiedades de un compuesto dependen de sus componentes, las formas físicas de éstos, y la manera en que se combinan para formar el material final. Algunos compuestos combinan una resistencia elevada con el poco peso, y son apropiadas para aplicarlos en componentes aeronáuticos, carrocerías de automóviles, cascos de barcos, raquetas de tenis, y cañas de pescar. Otros compuestos son fuertes, duros y capaces de conservar dichas propiedades a temperaturas elevadas, por ejemplo, las herramientas cortadoras de carburo cementado.

1.3 PROCESOS DE MANUFACTURA

Los procesos de manufactura se dividen en dos tipos básicos: 1) las operaciones del proceso, y 2) las del ensamblado. Una ***operación del proceso*** hace que un material de trabajo pase de un estado de acabado a otro más avanzado que está más cerca del producto final que se desea. Se agrega valor cambiando la geometría, las propiedades o la apariencia del material de inicio. En general, las operaciones del proceso se ejecutan sobre partes discretas del trabajo, pero algunas también son aplicables a artículos ensamblados. Una ***operación de ensamblado*** une dos o más componentes a fin de crear una entidad nueva, llamada ensamble, subensamble o algún otro término que se refiera al proceso de unión (por ejemplo, un ensamble soldado se denomina ***soldadura***). En la figura 1.4 se presenta una

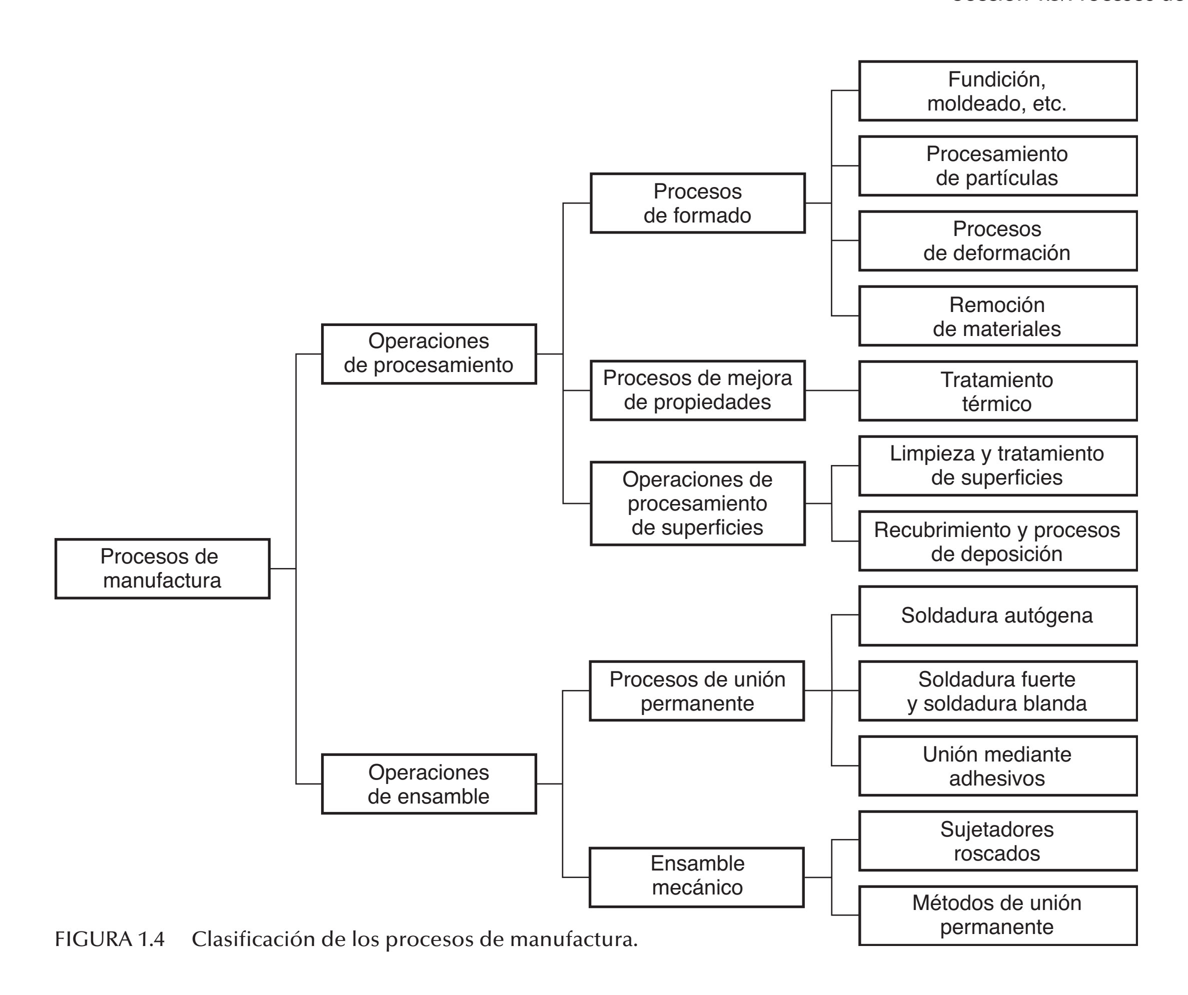


FIGURA 1.4 Clasificación de los procesos de manufactura.

clasificación de procesos de manufactura. La mayor parte de los procesos de manufactura que se estudian en este libro se pueden observar en el disco de video digital (DVD) que viene adjunto. A lo largo del texto se dan avisos sobre dichos cortos de video. Algunos de los procesos básicos que se emplean en la manufactura moderna datan de la antigüedad (véase la nota histórica 1.2).

Nota histórica 1.2 *Materiales y procesos de manufactura*

En tanto que la mayor parte de los desarrollos históricos que constituyen la práctica moderna de la manufactura han tenido lugar sólo durante los últimos siglos (véase la nota histórica 1.1), varios de los procesos básicos de fabricación datan del periodo Neolítico (alrededor de 8000-3000 a. C.). Fue durante ese periodo que se desarrollaron procesos tales como los siguientes: tallar y ***trabajar la madera***, formar a mano y ***cocer*** vasijas de arcilla, ***tallar*** y ***pulir*** piedra, ***hilar*** y ***tejer*** textiles, y ***teñir*** la ropa.

La metalurgia y el trabajo de los metales también comenzaron en el Neolítico, en Mesopotamia y otras áreas alrededor del Mediterráneo. Se extendió hacia regiones de Europa y Asia o se desarrolló en ellas de manera independiente. El ser humano primitivo encontraba el oro en la naturaleza en forma relativamente pura. Podía ***martillarlo*** para darle forma. Es probable que el cobre sea el primer metal que se extraía de yacimientos, lo que requería del ***fundido*** como técnica de procesamiento. El cobre no podía ser martillado con facilidad debido a que se endurecía, en su lugar, se le daba forma por medio de la ***fundición*** (véase la nota histórica 10.1). Otros metales utilizados durante este periodo fueron la plata y el estaño. Se descubrió que la aleación de cobre con estaño producía un metal más fácil de trabajar que el cobre puro (podía usarse tanto la fundición como el martillado). Esto anunció el periodo importante que se conoce como la ***Edad de Bronce*** (alrededor de 3500-1500 a. C.).

El hierro también fue fundido por primera vez durante la Edad de Bronce. Es posible que los meteoritos hayan sido una fuente de ese metal, pero también se explotaban yacimientos. Las temperaturas requeridas para reducir el mineral de hierro a metal son significativamente más

elevadas que aquellas que se requieren para el cobre, lo que hace más difíciles las operaciones de los hornos. Por la misma razón, otros métodos de procesamiento también eran más difíciles. Los primeros herreros aprendieron que cuando ciertas clases de hierro (los que contenían cantidades pequeñas de carbono) se ***calentaban*** lo suficiente y después se ***enfriaban por inmersión***, se volvían muy duras. Esto permitía formar un borde muy afilado y cortante en los cuchillos y armas, pero también hacía que el metal fuera quebradizo. Podía incrementarse la dureza con el recalentamiento a una temperatura más baja, proceso conocido como ***templado***. Lo que se ha descrito es, por supuesto, el ***tratamiento térmico*** del acero. Las propiedades superiores del acero ocasionaron que sustituyera al bronce en muchas aplicaciones (armamento, agricultura y artefactos mecánicos). El periodo de su utilización se denominó posteriormente como ***Edad de Hierro*** (comenzó alrededor de 1000 a. C.). No fue hasta mucho después, bien entrado el siglo XIX, que la demanda de acero creció en forma significativa y se inventaron técnicas más modernas para su fabricación (véase la nota histórica 6.1).

Los principios de la tecnología de las máquinas herramienta ocurrieron durante la Revolución Industrial. En el periodo de 1770 a 1850, se crearon máquinas herramienta para la mayoría de los ***procesos de remoción de material*** convencionales, tales como ***perforar***, ***tornear***, ***rectificar***, ***fresar***, ***perfilar*** y ***cepillar*** (véase la nota histórica 22.1). Muchos de los procesos individuales anteceden en siglos a las máquinas herramienta; por ejemplo, perforar y aserrar (madera) datan de tiempos antiguos, y tornear (madera) se remonta a la época de Cristo.

Los métodos de ensamble se empleaban en las culturas antiguas para hacer barcos, armas, herramientas, implementos agrícolas, maquinaria, carruajes y carretas, muebles y prendas de ropa. Los procesos incluían ***sujetar*** con lianas y cuerdas, ***remachar*** y ***clavar***, y ***soldar***. Aproximadamente en tiempos de Cristo, se desarrollaron la ***soldadura con forja*** y la ***unión mediante adhesivos***. El uso extendido de tornillos, remaches y tuercas como sujetadores —tan común en el ensamble de hoy—, requirió la creación de máquinas herramienta capaces de cortar con exactitud las formas helicoidales que se requerían (por ejemplo, el torno de Maudsley para cortar tornillos, 1800). No fue sino hasta alrededor de 1900 que se empezaron a desarrollar los procesos de ***soldadura autógena por fusión*** como técnicas de ensamble (véase la nota histórica 30.1).

El caucho natural fue el primer polímero que se usó en la manufactura (si se excluye la madera, que es un polímero compuesto). El proceso de ***vulcanización***, descubierto por Charles Goodyear en 1839, hizo del caucho un material útil para la ingeniería (véase la nota histórica 8.2). Los desarrollos posteriores incluían a los plásticos tales como el nitrato de celulosa en 1870, la baquelita en 1900, el cloruro de polivinilo en 1927, el polietileno en 1932, y el nailon al final de la década de 1930 (véase la nota histórica 8.1). Los requerimientos de procesamiento para los plásticos condujeron al desarrollo del ***moldeo por inyección*** (con base en el vaciado en molde, uno de los procesos de fundición de metales) y otras técnicas para dar forma a los polímeros.

Los productos electrónicos han impuesto demandas inusuales a la manufactura en cuanto a miniaturización. La evolución de la tecnología ha ido en dirección de agrupar más y más dispositivos en un área cada vez más pequeña —en algunos casos, un millón de transistores en una pieza plana de material semiconductor que sólo mide 12 mm (0.50 in) por lado. La historia del procesamiento y el montaje electrónicos se remonta a sólo unas cuantas décadas (véanse las notas históricas 35.1, 36.1 y 36.2).

1.3.1 Operaciones de procesamiento

Una operación de procesamiento utiliza energía para modificar la forma, las propiedades físicas o la apariencia de una pieza, a fin de agregar valor al material. Las formas de la energía incluyen la mecánica, térmica, eléctrica y química. La energía se aplica en forma controlada por medio de maquinaria y herramientas. También se requiere de la energía humana, pero los trabajadores se emplean por lo general para controlar las máquinas, supervisar las operaciones y cargar y descargar las piezas antes y después de cada ciclo de operación. En la figura 1.1*a*) se ilustra un modelo general de operación de procesamiento. El material alimenta al proceso, las máquinas y herramientas aplican energía para transformar el material, y la pieza terminada sale del proceso. La mayoría de las operaciones de producción generan desperdicios o sobrantes, sea como un aspecto natural del proceso (por ejemplo, remoción de material como en el maquinado) o en forma de piezas defectuosas ocasionales. Un objetivo importante de la manufactura es reducir el desperdicio en cualquiera de esas formas.

Por lo general se requiere más de una operación de procesamiento para transformar el material de inicio a su forma final. Las operaciones se llevan a cabo en la secuencia particular que se requiere para alcanzar la geometría y condición definidas por las especificaciones del diseño.

Se distinguen tres categorías de operaciones de procesamiento: 1) operaciones de formado, 2) operaciones de mejoramiento de una propiedad, y 3) operaciones de procesamiento de una superficie. Las ***operaciones de formado*** alteran la geometría del material inicial de trabajo por medio de varios métodos. Los procesos comunes de formado incluyen al moldeado, la forja y el maquinado. Las ***operaciones de mejoramiento de una propiedad*** agregan valor al material con la mejora de sus propiedades físicas sin cambio de la forma. El ejemplo más común es el tratamiento térmico. Las ***operaciones de procesamiento de una superficie*** se ejecutan para limpiar, tratar, recubrir o depositar material sobre la superficie exterior del trabajo. Ejemplos comunes del recubrimiento son el cromado y el pintado. Los procesos de formado se estudian en las partes III a VI, y corresponden a las cuatro categorías principales de los procesos de formado que se muestran en la figura 1.4. Los procesos de mejoramiento de una propiedad y de procesamiento de una superficie se estudian en la parte VII.

Procesos de formado La mayor parte de los procesos de formado aplican calor o fuerzas mecánicas o una combinación de ambas para que surtan un efecto en la geometría del material de trabajo. Hay varias maneras de clasificar los procesos de formado. La clasificación que se utiliza en este libro se basa en el estado del material de inicio, y tiene cuatro categorías: 1) ***procesos de moldeado***, en los que el material con que se comienza es un ***líquido*** calentado o ***semifluido*** que se enfría y solidifica para formar la geometría de la pieza; 2) ***procesos de sinterizado o procesamiento de partículas***, en los que los materiales de inicio son ***polvos***, que se forman y calientan con la geometría deseada; 3) ***procesos de deformación***, en los que el material con que se comienza es un ***sólido dúctil*** (metal, por lo común) que se deforma para crear la pieza; y 4) ***procesos de remoción de material***, en los que el material de inicio es un ***sólido*** (dúctil o quebradizo), a partir del cual se retira material de modo que la pieza resultante tenga la geometría que se busca.

En la primera categoría, el material de inicio se calienta lo suficiente para transformarlo a un líquido o a un estado altamente plástico (semifluido). Casi todos los materiales se pueden procesar de esta manera. Los metales, vidrios cerámicos y plásticos pueden calentarse a temperaturas suficientemente elevadas para convertirlos en líquidos. El material en forma líquida o semifluida se vacía o se le fuerza para que fluya en una cavidad llamada molde, donde se enfría hasta la solidificación, con lo que adopta la forma del molde. La mayoría de procesos que operan de esta manera se denominan fundición o moldeado. ***Fundición*** es el término que se emplea para los metales, y ***moldeado*** es el nombre común usado para plásticos. En la figura 1.5 se ilustra esta categoría de procesos de formado.

En el ***procesamiento de partículas***, el material de inicio son polvos metálicos o cerámicos. Aunque estos dos materiales son muy diferentes, los procesos para darles forma a partir del procesamiento de partículas son muy similares. La técnica común involucra la presión y el sinterizado, que se ilustran en la figura 1.6, en las que los polvos primero se fuerzan hacia una cavidad llamada matriz o dado a una gran presión, y después se calientan para unir las partículas individuales.

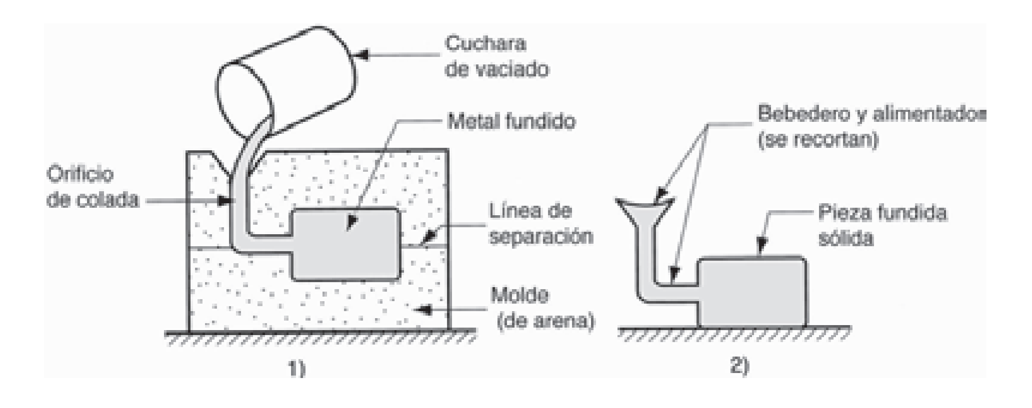


FIGURA 1.5 Los procesos de fundición y moldeado comienzan con un material de trabajo calentado hasta alcanzar un estado fluido o semifluido. Los procesos consisten en 1) vaciar el fluido en un molde, y 2) permitir que el fluido se enfríe hasta solidificarse, después de lo cual la pieza sólida se retira del molde.

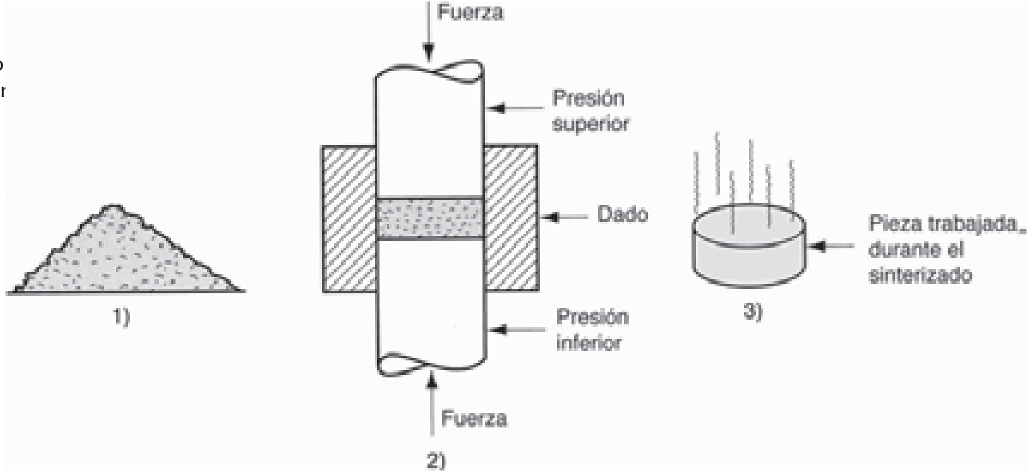


FIGURA 1.6 Procesamiento de partículas 1) el material de inicio es un polvo; el proceso usual consiste en 2) presionar y 3) sinterizar.

En los ***procesos de deformación***, la pieza inicial que se trabaja se conforma por medio de la aplicación de fuerzas que exceden la resistencia del material. Para que el material se forme de este modo, debe ser suficientemente dúctil para evitar que se fracture durante la deformación. Para incrementar su ductilidad (y por otras razones), es común que antes de darle forma, el material de trabajo se caliente hasta una temperatura por debajo del punto de fusión. Los procesos de deformación se asocian de cerca con el trabajo de los metales, e incluyen operaciones tales como el ***forjado*** y la ***extrusión***, que se ilustran en la figura 1.7.

Los ***procesos de remoción de material*** son operaciones que retiran el exceso de material de la pieza de trabajo con que se inicia, de modo que la forma que resulta tiene la geometría buscada. Los procesos más importantes de esta categoría son las operaciones de ***maquinado*** tales como ***torneado***, ***perforado*** y ***fresado***, que se muestran en la figura 1.8. Estas operaciones de corte se aplican más comúnmente a metales sólidos, y se llevan a cabo con el empleo de herramientas de corte más duras y fuertes que el metal de trabajo. Otro proceso común de esta categoría es el ***rectificado***. Otros procesos de remoción de material se conocen como ***no tradicionales*** debido a que utilizan láser, haces de electrones, erosión química, descargas eléctricas o energía electroquímica para retirar el material, en vez de herramientas de corte o rectificado.

Cuando una pieza inicial de trabajo se transforma en una geometría subsecuente, es deseable minimizar el desperdicio y los desechos. Ciertos procesos de conformación son más eficientes que otros, en términos de conservación del material. Los procesos de remoción de materiales (por ejemplo, el maquinado) tienden a desperdiciar material, tan sólo por la forma en que operan. El material que se retira de la forma inicial se desperdicia, al menos en lo referente a la operación unitaria. Otros procesos, tales como ciertas operaciones de fundición y moldeado, con frecuencia convierten casi el 100% del material con que se comienza en el producto final. Los procesos de manufactura que transforman casi todo el material de inicio

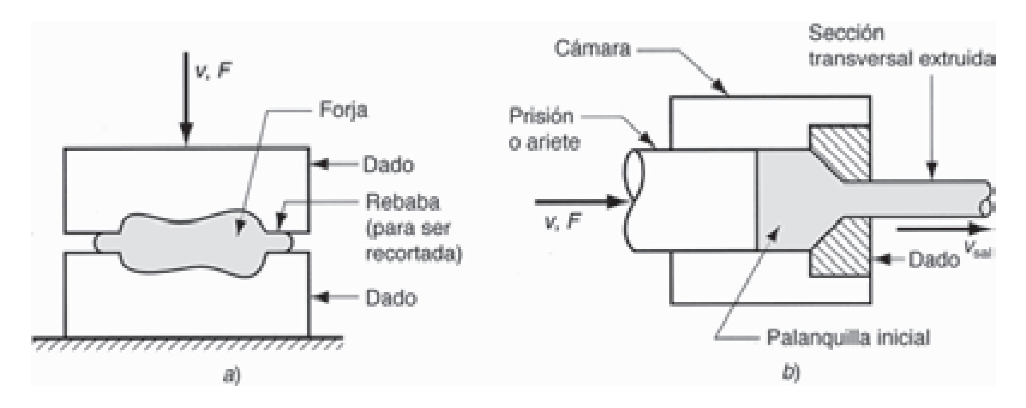


FIGURA 1.7 Algunos procesos de deformación comunes: *a*) **forjado**, en los que dos herramentales llamados dados comprimen la pieza de trabajo, lo que ocasiona que adopte la forma de los dos dados; y *b*) **extrusión**, en la que se fuerza a una palanquilla a fluir a través de un dado, por lo que adopta la sección transversal del orificio.

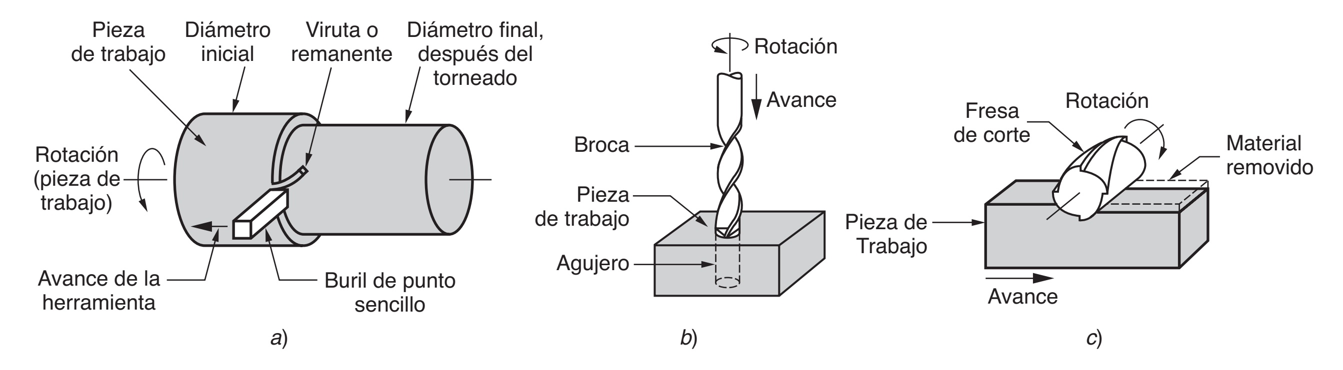


FIGURA 1.8 Operaciones comunes de maquinado: *a*) ***torneado***, en el que una herramienta de corte de un filo retira metal de una pieza de trabajo que gira, a fin de reducir su diámetro; *b*) ***taladrado***, en la que una broca en rotación avanza dentro de la pieza de trabajo, con lo que crea un agujero redondo; y *c*) ***fresado***, en la que una pieza de trabajo se hace avanzar por un cortador giratorio con filos múltiples.

en el producto, y no requieren maquinado posterior para alcanzar la geometría definitiva de la pieza, se llaman ***procesos de forma neta***. Otros procesos que requieren de un maquinado mínimo para producir la forma final, reciben el nombre de ***procesos de forma casi neta***.

Procesos de mejoramiento de una propiedad El segundo tipo principal de procesamiento de una pieza se lleva a cabo para mejorar las propiedades mecánicas o físicas del material de trabajo. Estos procesos no alteran la forma de la pieza, salvo de manera accidental en algunos casos. Los procesos más importantes de mejoramiento de una propiedad involucran los ***tratamientos térmicos***, que incluyen varios procesos de recocido y templado de metales y vidrios. El ***sinterizado*** de metales y cerámicos pulverizados, que se mencionó antes, también es un tratamiento a base de calor que aglutina una pieza de metal pulverizado y comprimido.

Procesamiento de una superficie Las operaciones de procesamiento de una superficie incluyen 1) limpieza, 2) tratamientos de una superficie, y 3) procesos de recubrimiento y deposición de una película delgada. La ***limpieza*** incluye procesos tanto químicos como mecánicos para retirar de la superficie suciedad, aceite y otros contaminantes. Los ***tratamientos de una superficie*** incluyen trabajos mecánicos tales como granallado y chorro de arena, así como procesos físicos tales como difusión e implantación de iones. Los procesos de ***recubrimiento*** y ***deposición de una película delgada*** aplican una capa de material a la superficie exterior de la pieza que se trabaja. Los procesos comunes de recubrimiento incluyen la ***galvanoplastia*** y ***anodización*** del aluminio, el ***recubrimiento*** orgánico (llamado ***pintado***), y el ***barnizado*** de porcelana. Los procesos de deposición de película incluyen la ***deposición física y química de vapor (PVD, QVD)***, a fin de formar recubrimientos de varias sustancias delgadas en extremo.

Se han adaptado varias operaciones severas de procesamiento de superficies para fabricar materiales semiconductores de los circuitos integrados para la microelectrónica. Esos procesos incluyen deposición química de vapor, deposición física de vapor y oxidación. Se aplican en áreas muy localizadas de la superficie de una oblea delgada de silicio (u otro material semiconductor) con objeto de crear el circuito microscópico.

1.3.2 Operaciones de ensamblado

El segundo tipo básico de operaciones de manufactura es el ***ensamblado***, en el que dos o más piezas separadas se unen para formar una entidad nueva. Dichos componentes se conectan ya sea en forma permanente o semipermanente. Los procesos de unión permanente incluyen la ***soldadura homogénea***, ***soldadura fuerte***, ***soldadura blanda***, y ***unión mediante adhesivos***. Forman una unión de componentes que no puede separarse con facilidad. Los métodos de ***ensamblado mecánico*** existen para sujetar dos (o más) partes en una pieza que se puede

desarmar a conveniencia. El uso de tornillos, remaches y otros ***sujetadores mecánicos***, son métodos tradicionales importantes de esta categoría. Otras técnicas de ensamblado mecánico que forman una conexión permanente incluyen los ***remaches***, ***ajustes de presión*** y ***ajustes de expansión***. En el ensamble de productos electrónicos, se emplean métodos de unión y sujeción especiales. Algunos de los métodos son idénticos a los procesos anteriores o adaptaciones de éstos, por ejemplo, la soldadura blanda. El ensamblado electrónico se relaciona en primer lugar con el ensamble de componentes tales como paquetes de circuitos integrados a tarjetas de circuitos impresos, para producir los circuitos complejos que se utilizan en tantos productos de la actualidad. En la parte VIII se estudian los procesos de unión y ensamblado, y en la IX, las técnicas de ensamblado especiales para la electrónica.

1.3.3 Máquinas de producción y herramientas

Las operaciones de manufactura se llevan a cabo con el uso de maquinaria y herramienta (y personas). El empleo extenso de maquinaria en la manufactura comenzó con la Revolución Industrial. Fue en esa época que las máquinas cortadoras de metal se desarrollaron y comenzaron a utilizarse en forma amplia. Recibían el nombre de ***máquinas herramienta*** que eran máquinas impulsadas por energía para operar herramientas de corte que antes se usaban con las manos. Las máquinas herramienta modernas se describen con la misma definición básica, excepto que la energía es eléctrica en lugar de hidráulica o de vapor, y su nivel de precisión y automatización es mucho mayor hoy día. Las máquinas herramienta están entre las más versátiles de todas las que se aplican en la producción. Se emplean no sólo para hacer piezas de productos para el consumidor, sino también para elaborar componentes para otras máquinas de la producción. Tanto en un sentido histórico como de reproducción, la máquina herramienta es la madre de toda la maquinaria.

Otras máquinas para la producción incluyen ***prensas*** para las operaciones de estampado, ***martillos forjadores*** para forjar, ***molinos de laminación*** para la fabricar lámina metálica, ***máquinas soldadoras*** para soldar, y ***máquinas de inserción*** para insertar componentes electrónicos en tarjetas de circuitos impresos. Por lo general, el nombre del equipo antecede al nombre del proceso.

El equipo de producción puede ser de propósito general o especial. El ***equipo de propósito general*** es más versátil y adaptable a una variedad de trabajos. Se halla disponible en el comercio para cualquier compañía manufacturera que quiera invertir en él. El ***equipo de propósito especial*** por lo general está diseñado para producir una pieza o un producto específico en cantidades muy grandes. La economía de la producción en masa justifica las grandes inversiones en maquinaria de propósito especial a fin de alcanzar eficiencias elevadas en ciclos cortos de tiempo. Ésta no es la única razón de ser del equipo de propósito especial, pero es la principal. Otra razón es que el proceso puede ser único y el equipo comercial no se encuentre disponible. Algunas compañías con requerimientos únicos de proceso desarrollan su propio equipo de propósito especial.

Por lo general, la maquinaria de producción requiere ***herramientas*** que se integren en el equipo para el trabajo de la pieza o producto en particular. En muchos casos, el herramental debe diseñarse específicamente para la configuración de la pieza o producto. Cuando se utiliza con equipo de propósito general, está diseñada para ser intercambiable. Las herramientas se sujetan a la máquina para cada tipo de producto y se fabrica el volumen de producción. Al terminar, se cambian las herramientas para el tipo siguiente de producto por trabajar. Cuando se emplean con máquinas de propósito especial, es frecuente que las herramientas estén diseñadas como parte integral de la máquina. Debido a que es probable que para la producción en masa se empleen máquinas de propósito especial, las herramientas quizá nunca cambien, excepto para reemplazar componentes usados o reparar superficies desgastadas.

El tipo de herramientas depende del tipo de proceso de manufactura. En la tabla 1.4 se enlistan ejemplos de herramientas especiales que se emplean en operaciones diversas. Los detalles se dan en los capítulos en que se estudian los procesos respectivos.

TABLA 1.4 Equipo de producción y las herramientas que se emplean para varios procesos de manufactura.

Proceso	Equipo	Herramientas especiales (función)
Fundición	[a]	Molde (cavidad para metal fundido)
Moldeado	Máquina de moldeado	Molde (cavidad para polímeros calientes)
Laminado	Molino de laminación	Rodillo (reduce espesor de la pieza)
Forjado	Martillo o prensa forjadora	Dado o matriz (comprime el trabajo para darle forma)
Extrusión	Prensa	Dado de extrusión (reduce la sección transversal)
Estampado	Prensa	Matrices y punzones (corte y conformación de lámina metálica)
Maquinado	Máquina herramienta	Herramienta de corte (remoción de material)
		Accesorio (sujeta la pieza de trabajo)
		Guía (sujeta la pieza y guía la herramienta)
Rectificado	Rectificadora	Rueda de rectificado (remoción de material)
Soldadura	Soldadora	Electrodo (funde el metal que se trabaja)
		Sujetador (sujeta las piezas durante la soldadura)

[a] Tipos distintos de dispositivos y equipos para fundir (véase el capítulo 11).

1.4 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Para operar con eficacia, una empresa de manufactura debe tener sistemas que le permitan llevar a cabo con eficiencia su tipo de producción. Los sistemas de producción consisten en personas, equipos y procedimientos diseñados para combinar materiales y procesos que constituyen las operaciones de manufactura de la compañía. Los sistemas de producción se dividen en dos categorías: 1) instalaciones de producción, y 2) sistemas de apoyo a la manufactura. Las ***instalaciones de producción*** se refieren al equipo físico y su arreglo dentro de la fábrica. Los ***sistemas de apoyo a la manufactura*** son los procedimientos utilizados por la compañía para administrar la producción y resolver los problemas técnicos y logísticos que se encuentran en la ordenación de los materiales, el movimiento del trabajo por la fábrica, y asegurar que los productos satisfagan estándares de calidad. Ambas categorías incluyen personas. Son éstas las que hacen que los sistemas funcionen. En general, la mano de obra directa (*trabajadores de cuello azul*) es responsable de operar el equipo de manufactura, y el personal profesional (*trabajadores de cuello blanco*) es el encargado de dar apoyo a la manufactura.

1.4.1 Instalaciones de producción

Las instalaciones de producción consisten en el equipo de producción y el de manejo de materiales. El equipo entra en contacto físico directo con las piezas o ensambles durante su fabricación. Las instalaciones "tocan" el producto. Éstas también incluyen la manera en que el equipo se acomoda dentro de la fábrica —la ***distribución de la planta (layout)—***. Por lo general, el equipo se organiza en agrupamientos lógicos, llamados ***sistemas de manufactura***, tales como una línea de producción automatizada, o una celda de manufactura que consiste en un robot industrial y dos o más máquinas herramienta.

Una compañía de manufactura trata de diseñar sus sistemas de manufactura y organizar sus fábricas para que sirvan a la misión particular de cada planta del modo más eficiente. A lo largo de los años, ciertos tipos de instalaciones de producción han llegado a ser reconocidos como la forma más apropiada de organizar una combinación dada de diversos productos y cantidad de producción, según se estudió en la sección 1.1.2. Se requieren instalaciones diferentes para cada uno de los tres rangos de cantidades anuales de producción.

Producción de bajas cantidades En el rango de cantidad baja (1 a 100 unidades por año), es frecuente utilizar el término ***taller de trabajo*** para describir el tipo de instalación productiva. Un taller hace cantidades bajas de productos especializados y personalizados. Es común

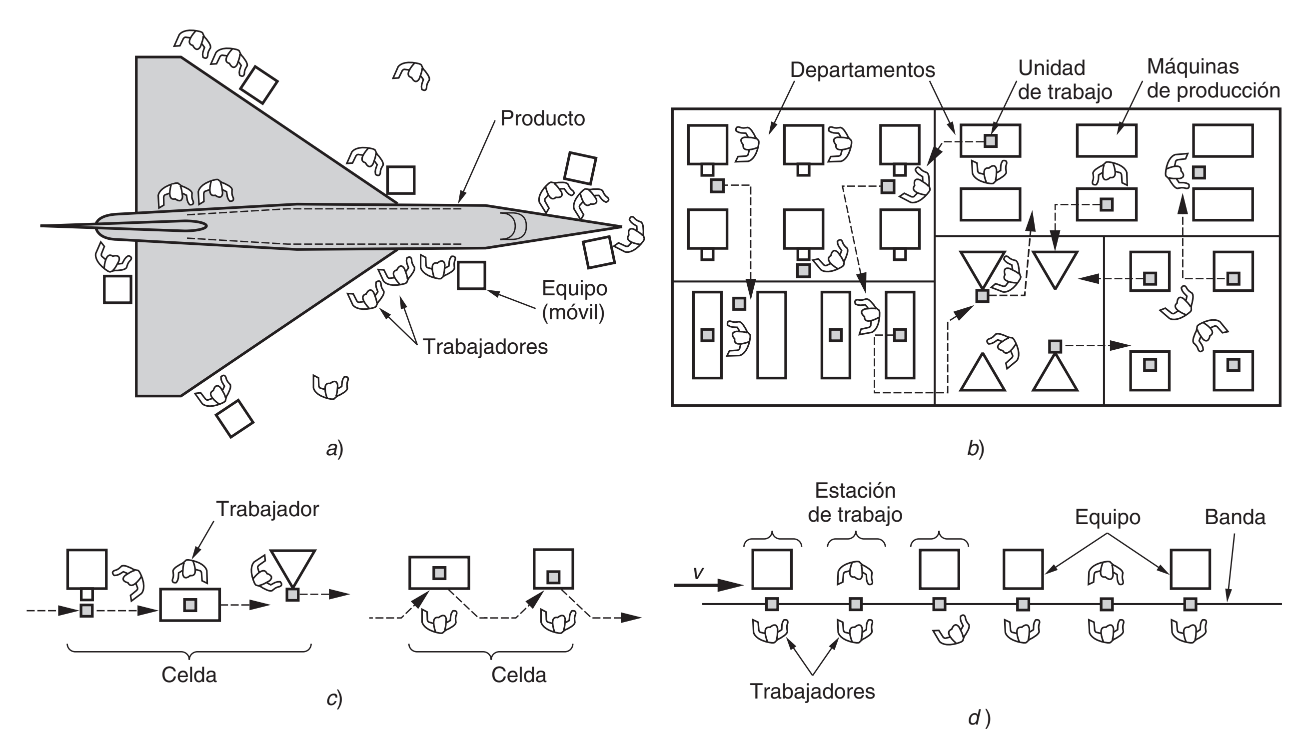


FIGURA 1.9 Tipos distintos de distribución de planta, *a*) distribución de posiciones fijas, *b*) distribución por procesos, *c*) distribución celular, y *d*) distribución por productos.

que éstos sean complejos, tales como cápsulas espaciales, aviones prototipo y maquinaria especial. El equipo de un taller de trabajo es de propósito general y el personal está muy capacitado.

Un taller de trabajo debe diseñarse para tener flexibilidad máxima a fin de poder enfrentar las variaciones amplias que se encuentren en el producto (variedad dura de producto). Si el producto es grande y pesado, y por tanto difícil de mover, es común que permanezca en una sola ubicación durante su fabricación o ensamble. Los trabajadores y el equipo de procesamiento van al producto, en vez de moverlo hacia el equipo. Este tipo de distribución se conoce como ***distribución de posiciones fijas***, como se ve en la figura 1.9*a*). En la situación pura, el producto permanece en un solo sitio durante toda la producción. Algunos ejemplos de tales productos incluyen barcos, aeronaves, locomotoras y maquinaria pesada. En la práctica, por lo general esos productos se construyen en módulos grandes, en ubicaciones únicas, y después los módulos terminados se reúnen para el ensamble final por medio de grúas de gran capacidad.

Con frecuencia, los componentes individuales de esos productos grandes se elaboran en fábricas en las que el equipo está situado de acuerdo con su función o tipo. Este acomodo se denomina ***distribución por procesos***. Como se aprecia en la figura 1.9*b*), los tornos están en un departamento, las fresadoras en otro, y así sucesivamente. Las distintas piezas, cada una de las cuales requiere una secuencia distinta de operaciones, se conducen por los departamentos en el orden particular que se necesita para procesarlas, por lo general por lotes. La distribución por procesos es notable por su flexibilidad; puede albergar una gran variedad de secuencias de operaciones para configuraciones distintas de las piezas. Su desventaja es que la maquinaria y métodos para producir una pieza no están diseñados para alcanzar una eficiencia elevada.

Producción de cantidad media En el rango de cantidad media (100 a 10 000 unidades por año), se distinguen dos tipos diferentes de instalaciones, en función de la variedad de productos. Cuando la variedad del producto es dura, el enfoque principal es la ***producción***

por lotes, en la que se fabrica un lote de un producto, después de lo cual el sistema de manufactura se cambia para producir un lote de otro producto, y así sucesivamente. La tasa de producción del equipo es mayor que la de demanda para cualquier tipo de producto, por lo que el mismo equipo puede compartirse para productos múltiples. El cambio entre los lotes de producción consume tiempo para cambiar las herramientas y preparar la maquinaria. Ese tiempo de preparación se pierde para la producción, y ésa es una desventaja de la manufactura por lotes. La producción por lotes se emplea comúnmente en situaciones de fabricación para el inventario, en las que los artículos se manufacturan para resurtir un inventario que ha disminuido por la demanda. Por lo general, el equipo se acomoda con una distribución por procesos (véase la figura 1.9*b*).

Es posible un enfoque alternativo para la producción de rango medio si la variedad del producto es suave. En ese caso, podrían no ser necesarios los cambios grandes entre un estilo de producto y el siguiente. Es frecuente que sea posible configurar el sistema de manufactura de modo que grupos de productos similares puedan hacerse en el mismo equipo sin pérdida significativa de tiempo por la preparación. El procesamiento o ensamblado de piezas o productos diferentes se lleva a cabo en celdas que consisten en varias estaciones de trabajo o máquinas. El término ***manufactura celular*** se asocia con frecuencia a este tipo de producción. Cada celda está diseñada para producir una variedad limitada de configuraciones de piezas; es decir, la celda se especializa en la producción de un conjunto dado de partes similares, de acuerdo con los principios de la ***tecnología de grupo*** (véase la sección 40.1). La distribución recibe el nombre de ***distribución celular*** (también es común el término ***distribución por tecnología de grupo***), y se ilustra en la figura 1.9*c*).

Producción alta El rango alto de cantidad (10 000 a millones de unidades por año) se conoce como ***producción masiva***. La situación se caracteriza por una tasa de demanda elevada para el producto, y el sistema de manufactura está dedicado a la producción de ese solo artículo. Se observan dos categorías de producción en masa: la producción por cantidad y la producción por línea de flujo. La ***producción por cantidad*** involucra la producción en masa de partes únicas sobre piezas únicas de equipo. Es común que sean máquinas estándar (tales como prensas de estampado) equipadas con herramientas especiales (por ejemplo, troqueles y dispositivos de manejo de materiales), que dedican efectivamente el equipo a la producción de un tipo de pieza. Las distribuciones típicas que se emplean en la producción por cantidad son por procesos y celular [véase la figura 1.9*b*) y *c*)].

La producción por línea de flujo incluye piezas múltiples de equipo o estaciones de trabajo situadas en secuencia, y las unidades de trabajo se mueven físicamente a través de ella a fin de que el producto se complete. Las estaciones de trabajo y el equipo están diseñados específicamente para que el producto maximice la eficiencia. La distribución se denomina ***por producto***, y las estaciones de trabajo se acomodan en una línea larga, como la de la figura 1.9*d*), o en una serie de segmentos de línea conectados. Generalmente, el trabajo se mueve entre las estaciones por medio de bandas mecanizadas. En cada estación se termina una cantidad pequeña del trabajo total sobre cada unidad del producto.

El ejemplo más familiar de producción en línea de flujo es la línea de ensamblado, que se asocia con productos como automóviles y aparatos domésticos. El caso puro de producción en línea de flujo es aquel en que no hay variación en los productos que se elaboran en la línea. Cada producto es idéntico y la línea se conoce como ***línea de producción de modelo único***. A fin de comercializar con éxito un producto dado, con frecuencia es benéfico introducir variaciones en las características y modelos, de modo que los clientes individuales puedan elegir la mercancía exacta que les agrade. Desde un punto de vista de la producción, las diferencias en las características representan un caso de variedad suave de productos. El término ***línea de producción de modelos mixtos*** se aplica a aquellas situaciones en las que hay variedad suave de productos que se fabrican en la línea. Un ejemplo de ello es el ensamble de los automóviles modernos. Los carros que salen de la línea de montaje tienen variaciones en las opciones y estilo, que representan modelos diferentes y en muchos casos diferentes placas para el mismo diseño básico de vehículo.

1.4.2 Sistemas de apoyo a la manufactura

Para operar las instalaciones de manera eficiente, una compañía debe organizarse para diseñar los procesos y equipos, planear y controlar las órdenes de producción, y satisfacer los requerimientos de la calidad del producto. Estas funciones se llevan a cabo por medio de sistemas de apoyo a la manufactura, es decir, gente y procedimientos con los que una compañía administra sus operaciones de producción. La mayoría de esos sistemas de apoyo no entran en contacto directo con el producto, pero planean y controlan su avance a través de la fábrica. Es frecuente que las funciones de apoyo a la manufactura se ejecuten en la empresa por personal organizado en departamentos como:

➢ ***Ingeniería de manufactura***. El departamento de ingeniería de manufactura es responsable de planear los procesos de manufactura, decidir cuáles procesos deben utilizarse para fabricar las piezas y ensamblar los productos. Este departamento también está involucrado en el diseño y el orden de las máquinas herramienta y otros equipos que usan los departamentos de operaciones para realizar el procesamiento y ensamble.

➢ ***Planeación y control de la producción***. Este departamento es responsable de resolver los problemas de logística de la manufactura: ordenar materiales y comprar piezas, programar la producción y asegurarse de que los departamentos de operación tengan la capacidad necesaria para cumplir los programas de producción.

➢ ***Control de calidad***. En el ambiente competitivo de hoy, producir artículos de alta calidad debe ser la prioridad máxima de cualquier empresa de manufactura. Eso significa diseñar y construir productos que cumplan las especificaciones y llenen o superen las expectativas de los consumidores. Gran parte del esfuerzo es responsabilidad de este departamento.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL LIBRO

Las tres secciones anteriores proporcionan una vista preliminar y un panorama general del libro. Los 44 capítulos siguientes están organizados en 11 partes. El diagrama de bloques de la figura 1.10 resume los temas principales que habrán de cubrirse. Muestra al sistema de producción (representado con línea punteada) con la entrada de los materiales de la ingeniería en el lado izquierdo, y la salida de los productos terminados en el derecho. La parte I, titulada “Propiedades de los materiales y atributos del producto”, consiste en cuatro capítulos que describen las características y especificaciones importantes de

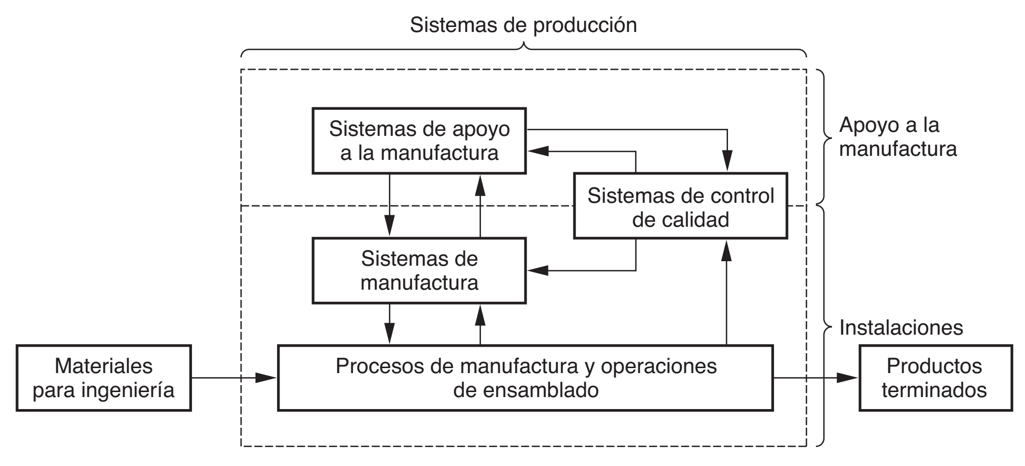


FIGURA 1.10 Panorama de los temas principales del libro.

los materiales, así como de los productos que se fabrican a partir de ellos. En la parte II se estudian los cuatro materiales fundamentales de la ingeniería: metales, cerámicos, polímeros y compuestos.

El bloque más grande de la figura 1.10 se identifica como “Procesos de manufactura y operaciones de ensamblado”. Los procesos incluidos en el libro son aquellos que aparecen en la figura 1.4. La parte III comienza el estudio de las cuatro categorías de los procesos de perfilado. Consiste de seis capítulos acerca de los procesos de solidificación que incluyen la fundición de metales, el trabajo del vidrio, y la conformación de polímeros. En la parte IV, se estudia en dos capítulos el procesamiento de partículas de metales y cerámicos. En la parte V se analizan los procesos de deformación de los metales, tales como el laminado, forjado, extrusión, y el trabajo con láminas metálicas. Por último, en la parte VI se estudian los procesos de remoción de materiales. Son cuatro los capítulos que se dedican al maquinado, y dos los que cubren el esmerilado o rectificado (y otros procesos abrasivos relacionados) y las tecnologías no tradicionales de remoción de materiales.

Los otros tipos de operaciones de procesamiento, mejoramiento de las propiedades y procesamiento de superficies, se estudian en la parte VII. Sus tres capítulos son acerca de tratamiento térmico, limpieza y tratamiento de superficies, y recubrimiento y procesos de deposición.

Los procesos de unión y ensamblado se consideran en la parte VIII, que está organizada en cuatro capítulos acerca de soldadura homogénea, soldadura fuerte, soldadura blanda, unión mediante adhesivos y ensamblado mecánico.

En la parte IX, que lleva por título “Tecnologías especiales de procesamiento y ensamblado”, se presentan varios procesos únicos que no se ajustan con exactitud en el esquema de clasificación de la figura 1.4. Sus cinco capítulos cubren la hechura de prototipos rápidos, el proceso de circuitos integrados, ensambles y empaques electrónicos, microfabricación y nanofabricación.

Los bloques restantes de la figura 1.10 se refieren a los sistemas de producción. La parte X, titulada “Sistemas de manufactura”, cubre los sistemas principales de tecnologías y agrupamientos de equipos que se localizan en la fábrica: control numérico, robótica industrial, tecnología de grupos, manufactura celular, sistemas flexibles de manufactura, y líneas de producción. Por último, en la parte XI se estudian los sistemas de apoyo a la manufactura, tales como ingeniería de manufactura, planeación y control de la producción, control de calidad, e inspección.

REFERENCIAS

[1] DeGarmo, E. P., Black, J. T., y Kohser, R. A. ***Materials and Processes in Manufacturing***, 9a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.

[2] Emerson, H. P., y Naehring, D. C. E. ***Origins of Industrial Engineering***. Industrial Engineering & Management Press, Institute of Industrial Engineers, Norcross, Ga., 1988.

[3] Flinn, R. A., y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***. 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[4] Garrison, E. ***A History of Engineering and Technology.*** CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla., 1991.

[5] Groover, M. P. ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing***, 2a. ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

[6] Hounshell, D. A. ***From the American System to Mass Production***, ***1800-1932***. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Md., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

1.1. ¿Cuáles son las diferencias entre las industrias primaria, secundaria y terciaria? Proporcione un ejemplo de cada categoría.

1.2. ¿Qué es un bien de capital? Diga un ejemplo.

1.3. ¿Cómo se relacionan la variedad de productos y la cantidad de producción, al comparar fábricas comunes?

1.4. Defina la capacidad de manufactura.

1.5. Mencione las tres categorías básicas de materiales.

1.6. ¿En qué difiere un proceso de formado de una operación de procesamiento de una superficie?
1.7. ¿Cuáles son las dos subclases de procesos de ensamble? Proporcione un ejemplo de proceso de cada subclase.
1.8. Defina producción por lotes y describa por qué se utiliza con frecuencia para producir artículos en cantidades medias.
1.9. En las instalaciones de producción, ¿cuál es la diferencia entre una distribución por procesos y otra por producto?
1.10. Mencione dos departamentos que sean comúnmente clasificados como de apoyo a la manufactura.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 18 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

1.1. ¿Cuáles de las industrias siguientes se clasifican como de industria secundaria? (hay tres respuestas correctas): *a*) bebidas, *b*) servicios financieros, *c*) pesca, *d*) minería, *e*) instalaciones de generación de energía, *f*) editorial, y *g*) transporte.
1.2. En cuál de las siguientes industrias se clasifica la minería: *a*) industria agrícola, *b*) industria manufacturera, *c*) industria primaria, *d*) industria secundaria, *e*) industria de servicios, o *f*) industria terciaria.
1.3. Uno de los siguientes artículos incluye los inventos de la Revolución Industrial: *a*) automóviles, *b*) cañón, *c*) prensa de impresión, *d*) máquina de vapor, o *e*) espada.
1.4. ¿A cuáles de los siguientes metales incluyen los metales ferrosos? (dos respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) hierro fundido, *c*) cobre, *d*) oro, y *e*) acero.
1.5. ¿Cuáles de los siguientes materiales de ingeniería se definen como un compuesto que contiene elementos metálicos y no metálicos?: *a*) cerámico, *b*) compuesto, *c*) metal, o *d*) polímero.
1.6. ¿Cuál de los procesos siguientes comienza con un material en estado fluido o semifluido, que se solidifica en un molde? (dos de estas respuestas son las mejores): *a*) fundido, *b*) forjado, *c*) maquinado, *d*) moldeado, *e*) prensado, y *f*) torneado.
1.7 ¿Cuáles de las siguientes etapas involucra el procesamiento de partículas de metales y cerámicos? (las dos respuestas mejores): *a*) uniones mediante adhesivos, *b*) deformación, *c*) forjado, *d*) remoción de material, *e*) fusión, *f*) prensado, y *g*) sinterizado.
1.8. ¿Cuáles de los siguientes incluyen los procesos de deformación? (dos respuestas correctas): *a*) fundido, *b*) perforado, *c*) extruido, *d*) forjado, *e*) fresado, *f*) pintado, y *g*) sintetizado.
1.9. ¿Cuál de las siguientes es una máquina que se usa para extruir?: *a*) martillo forjador, *b*) fresadora, *c*) laminadora, *d*) prensa, *e*) soplete.
1.10. La producción de volumen elevado de productos ensamblados se asocia más a alguno de los tipos de distribución siguientes: *a*) celular, *b*) de posición fija, *c*) por procesos, *d*) por productos.
1.11. ¿Cuáles de las funciones siguientes ejecuta un departamento de planeación y control de la producción, en cuanto a su papel de apoyar a la manufactura? (las dos respuestas mejores): *a*) diseñar y ordenar máquinas herramienta, *b*) desarrollar planes corporativos estratégicos, *c*) ordenar materias y adquirir piezas, *d*) efectuar inspecciones de calidad, y *e*) programar el orden de los productos sobre una máquina.

Parte I
Propiedades de los materiales y atributos del producto

2 LA NATURALEZA DE LOS MATERIALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

La comprensión de los materiales es fundamental en el estudio de los procesos de manufactura. En el capítulo 1, se definió la manufactura como un proceso de transformación. Es el material lo que se transforma; y lo que determina el éxito de la operación es cómo éste se comporta cuando cumple con los requerimientos de resistencia a fuerzas, temperaturas y otros parámetros físicos particulares. Se observa que algunos materiales responden bien a ciertos tipos de procesos de manufactura, y mal, o nada, a otros. ¿Cuáles son las características y propiedades de los materiales que determinan su capacidad para transformarse a través de procesos diferentes?

En este capítulo se estudia la estructura atómica de la materia, y los enlaces entre los átomos y las moléculas. También se analiza la manera en que los átomos y moléculas de los materiales de ingeniería se organizan por sí solos en dos formas estructurales: cristalina y no cristalina. Se verá que los materiales básicos de ingeniería —metales, cerámicas y polímeros— existen en cualquier forma, aunque por lo general cada material tiene una tendencia para adoptar alguna forma en particular. Por ejemplo, los metales en estado sólido casi siempre existen como cristales. El vidrio, por ejemplo, el utilizado en las ventanas, y otros cerámicos, adoptan una forma no cristalina.

2.1 ESTRUCTURA ATÓMICA Y LOS ELEMENTOS

La unidad estructural fundamental de la materia es el átomo. Cada átomo está compuesto de un núcleo con carga positiva, rodeado por un número suficiente de electrones con carga

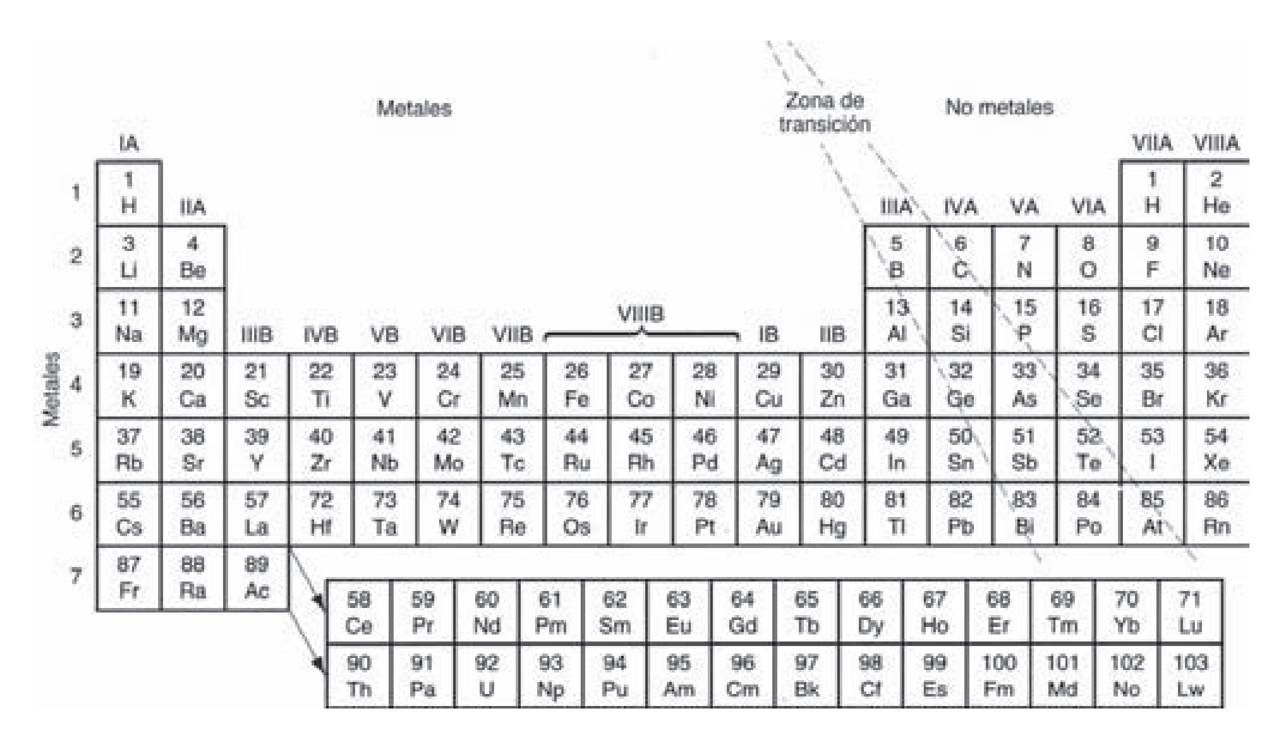


FIGURA 2.1 Tabla periódica de los elementos. Los símbolos y números atómicos están listados para los 103 elementos.

negativa de modo que las cargas quedan balanceadas. El número de electrones identifica el número atómico y el elemento del átomo. Hay poco más de 100 elementos (sin contar unos cuantos adicionales que se han sintetizado artificialmente), que constituyen los fundamentos químicos de toda la materia.

Así como existen diferencias entre los elementos, también hay similitudes. Los elementos se agrupan en familias y en relaciones que se establecen entre las familias y dentro de ellas por medio de la tabla periódica, la cual se muestra en la figura 2.1. En dirección horizontal hay cierta repetición o periodicidad en la disposición de los elementos. Los elementos metálicos ocupan la porción izquierda y central de la tabla; los no metálicos se ubican a la derecha. Entre ellos y a lo largo de una diagonal, hay una zona de transición que contiene los elementos llamados ***metaloides*** o ***semimetales***. En principio, cada elemento puede existir como sólido, líquido o gas, dependiendo de la temperatura y la presión. A temperatura y presión atmosférica ambientes, cada uno de ellos tiene una fase natural; por ejemplo, el hierro (Fe) es un sólido, el mercurio (Hg) es un líquido y el nitrógeno (N) es un gas.

Los elementos en la tabla están dispuestos en columnas verticales y en filas horizontales de tal manera que existen semejanzas entre los elementos que están en la misma columna. En la columna de la extrema derecha, por ejemplo, están los ***gases nobles*** (helio, neón, argón, kriptón, xenón y radón), todos los cuales presentan gran estabilidad química y una tasa de reacción baja. Los ***halógenos*** (flúor, cloro, bromo, yodo y astato) ubicados en la columna VIIA, comparten propiedades similares (el hidrógeno no está incluido en los halógenos). Los ***metales nobles*** (cobre, plata y oro) en la columna IB tienen propiedades semejantes. Por lo general hay correlaciones entre las propiedades de los elementos en una columna dada, en tanto que existen diferencias entre los elementos que están en columnas distintas.

Muchas de las similitudes y diferencias entre los elementos pueden explicarse por sus respectivas estructuras atómicas. El modelo de estructura atómica más simple, que se conoce como modelo planetario, muestra los electrones de los átomos orbitando alrededor del núcleo a ciertas distancias fijas, denominadas capas, como se muestra en la figura 2.2. El átomo de hidrógeno (número atómico 1) tiene un electrón en la órbita más cercana al

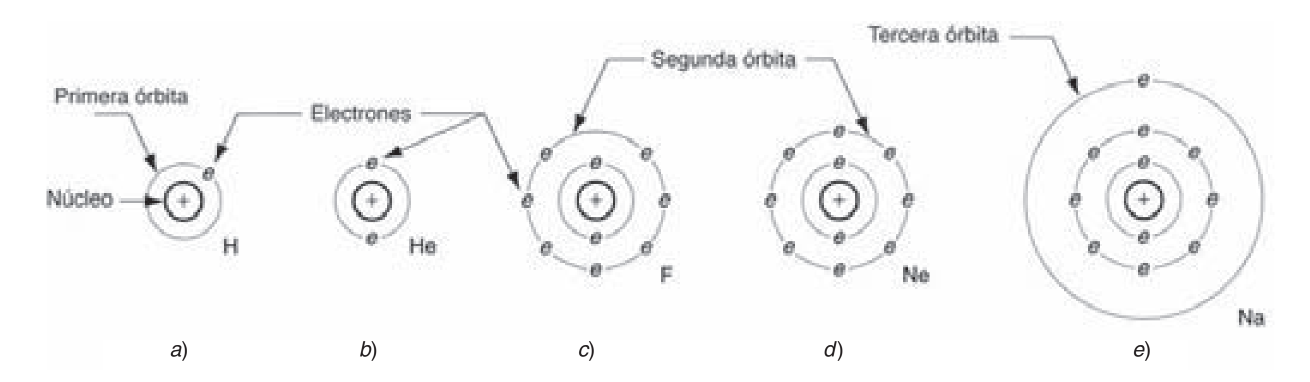


FIGURA 2.2 Modelo simple de la estructura atómica de varios elementos: *a*) hidrógeno, *b*) helio, *c*) flúor, *d*) neón, y *e*) sodio.

núcleo. El helio (número atómico 2) tiene dos. En la figura también se aprecian las estructuras atómicas del flúor (número atómico 9), neón (número atómico 10) y sodio (número atómico 11). De estos modelos se infiere que existe un número máximo de electrones que puede estar contenido en una órbita dada. Esto es correcto, y ese máximo está definido por la expresión

$$\text{Número máximo de electrones en una órbita} = 2n^2 \tag{2.1}$$

donde n identifica la órbita, con $n = 1$ la más cercana al núcleo.

El número de electrones en la capa más externa, en relación con el número máximo permitido, determina en gran parte la afinidad química de un átomo con otros. Dichos electrones de la capa externa reciben el nombre de ***electrones de valencia***. Por ejemplo, debido a que un átomo de hidrógeno tiene tan sólo un electrón en su única órbita, se combina con facilidad con otro átomo de hidrógeno para formar la molécula del hidrógeno, H_2. Por esta misma razón, el hidrógeno también reacciona con facilidad con otros elementos (por ejemplo, para formar H_2O). En el átomo del helio, los dos electrones en su única órbita son el máximo permisible ($2n^2 = 2(1)^2 = 2$), por lo que el helio es muy estable. El neón es estable por la misma razón: su órbita exterior ($n = 2$) tiene ocho electrones (el máximo permisible), por lo que el neón es un gas inerte.

En contraste con el neón, el flúor tiene un electrón menos en su capa exterior ($n = 2$) que el máximo permisible, y es atraído con facilidad hacia otros elementos que pueden compartir un electrón para formar un conjunto más estable. El átomo del sodio parece hecho a la perfección para esa situación, con un electrón en su órbita externa. Reacciona con intensidad ante el flúor para formar el compuesto fluoruro de sodio, como se ilustra en la figura 2.3.

Para los números atómicos pequeños que se han considerado, la predicción del número de electrones en la órbita exterior es directa. Conforme el número atómico se incrementa a niveles más altos, la asignación de electrones a las órbitas diferentes se vuelve algo más complicada. Hay reglas y lineamientos, que basados en la mecánica cuántica, que

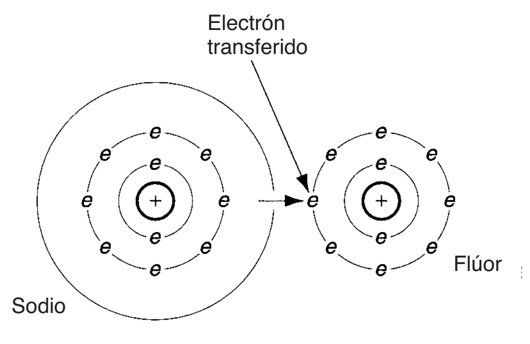


FIGURA 2.3 La molécula de fluoruro de sodio se forma por la transferencia del electrón "sobrante" del átomo del sodio para completar la órbita exterior del átomo del flúor.

se usan para predecir las posiciones de los electrones en las diferentes órbitas y así explicar sus características. El estudio de dichas reglas se encuentra más allá del alcance del estudio de los materiales para la manufactura.

2.2 ENLACES ENTRE ÁTOMOS Y MOLÉCULAS

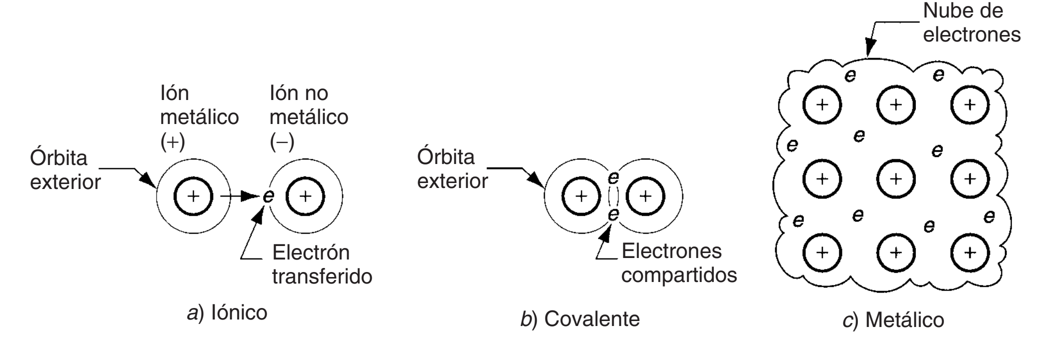
Los átomos se mantienen reunidos en forma de moléculas por medio de varios tipos de enlaces que dependen de los electrones de valencia. Por comparación, las moléculas se atraen unas con otras con enlaces más débiles, que por lo general resultan de la configuración de electrones en las moléculas individuales. Así, se tienen dos tipos de enlaces: 1) enlaces primarios, asociados por lo general con la formación de moléculas, y 2) enlaces secundarios, que se asocian generalmente con la atracción entre moléculas. Los enlaces primarios son mucho más fuertes que los secundarios.

Enlaces primarios Los enlaces primarios se caracterizan por atracciones fuertes de átomos con átomos que involucran el intercambio de electrones de valencia. Los enlaces primarios incluyen las formas siguientes: *a*) iónico, *b*) covalente, y *c*) metálico, como se ilustra en la figura 2.4. Los enlaces iónicos y covalentes se llaman ***intramoleculares*** debido a que involucran fuerzas de atracción entre los átomos de la molécula.

En el ***enlace iónico***, los átomos de un elemento entregan su(s) electrón(es) exterior(es), los que a su vez atraen a los átomos de algún otro elemento para incrementar a ocho su cuenta de electrones en la capa exterior. En general, ocho electrones en la capa exterior es la configuración más estable (excepto para los átomos muy ligeros), y la naturaleza proporciona un enlace muy fuerte entre átomos que adoptan esta configuración. El ejemplo anterior de la reacción del sodio con el flúor para formar fluoruro de sodio (véase la figura 2.3) ilustra esta forma de enlace atómico. El cloruro de sodio (sal de mesa) es un ejemplo más común. Debido a la transferencia de electrones entre los átomos, se forman ***iones*** de sodio y flúor (o de sodio y cloro), de los que se deriva el nombre de este enlace. Las propiedades de los materiales sólidos con enlaces iónicos incluyen baja conductividad eléctrica y deficiente ductilidad.

El ***enlace covalente*** es aquel en el que los átomos comparten electrones (a diferencia de los que se transfieren) en sus capas externas a fin de lograr un conjunto estable de ocho. El flúor y el diamante son dos ejemplos de enlaces covalentes. En el flúor, un electrón de cada dos átomos se comparte para formar gas F_2, como se ilustra en la figura 2.5*a*). En el caso del diamante, que es carbono (número atómico 6), cada átomo tiene cuatro vecinos con los que comparte electrones. Esto produce una estructura tridimensional muy rígida, que no está adecuadamente representada en la figura 2.5*b*), y que es responsable de la dureza extrema de este material. Otras formas de carbono (por ejemplo, grafito) no muestran

FIGURA 2.4 Tres formas de enlace primario: *a*) iónico, *b*) covalente, y *c*) metálico.



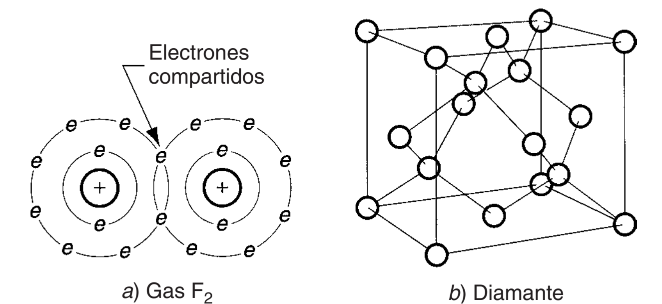


FIGURA 2.5 Dos ejemplos de enlace covalente: *a*) gas flúor F_2, y *b*) diamante.

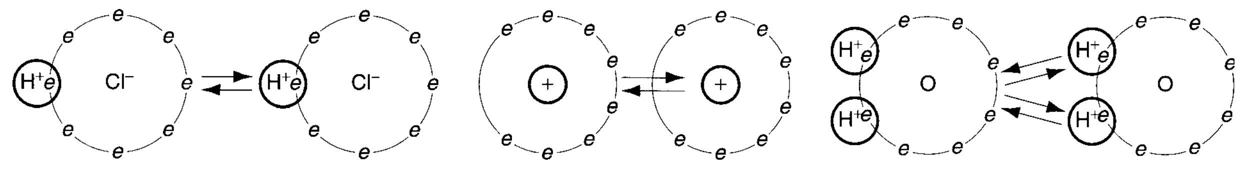
esta estructura atómica rígida. Los sólidos con enlaces covalentes por lo general tienen una dureza grande y conductividad eléctrica baja.

El enlace metálico es, por supuesto, el mecanismo de enlace atómico en los metales puros y sus aleaciones. Por lo general, los átomos de los elementos metálicos poseen muy pocos electrones en sus órbitas externas para completar las capas exteriores de todos los átomos, por decir, un bloque de metal dado. En consecuencia, en lugar de compartir una base de átomo con átomo, el ***enlace metálico*** involucra compartir los electrones de la capa exterior por medio de todos los átomos para formar una nube de electrones general que abarca al bloque entero. Esta nube proporciona las fuerzas de atracción para mantener juntos a los átomos y formar una estructura rígida y fuerte en la mayoría de los casos. Debido al modo en que comparten electrones y a la libertad que tienen éstos para moverse dentro del metal, el enlace metálico proporciona conductividad eléctrica buena. En contraste, los otros tipos de enlaces primarios involucran compartir localmente electrones sólo entre átomos vecinos, por lo que esos materiales son conductores eléctricos malos. Otras propiedades frecuentes de los materiales con enlace metálico incluyen la buena conducción del calor y una buena ductilidad. (Aunque ya se definieron algunos de estos términos, se espera que los conocimientos generales del lector le permitan entender las propiedades de los materiales.)

Enlaces secundarios Mientras que los enlaces primarios involucran fuerzas de atracción de átomo con átomo, los enlaces secundarios implican fuerzas entre moléculas, o ***intermoleculares***. En un enlace secundario no hay transferencia ni se comparten electrones, por lo que dichos enlaces son más débiles que los primarios. Hay tres formas de enlace secundario: *a*) fuerzas dipolares, *b*) fuerzas de London, y *c*) enlace de hidrógeno, los cuales se ilustran en la figura 2.6. Los tipos *a* y *b* con frecuencia reciben el nombre de fuerzas de ***Van der Waals***, en honor del científico que las estudió y cuantificó por primera vez.

Las ***fuerzas dipolares*** se presentan en una molécula formada por dos átomos con cargas eléctricas iguales y opuestas. Por tanto, cada molécula forma un dipolo, como se ilustra en la figura 2.6*a*) para el cloruro de hidrógeno. Aunque el material es eléctricamente neutro en su forma agregada, a escala molecular los dipolos individuales se atraen uno a otro, dando la orientación apropiada de los extremos positivo y negativo de las moléculas. Estas fuerzas dipolares proporcionan un enlace neto intermolecular dentro del material.

FIGURA 2.6 Tres tipos de enlaces secundarios: *a*) fuerzas dipolares, *b*) fuerzas de London, y *c*) enlace de hidrógeno.



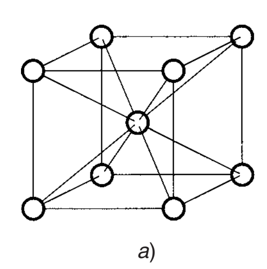
Las ***fuerzas de London*** involucran fuerzas de atracción entre moléculas no polares; es decir, los átomos en la molécula no forman dipolos en el mismo sentido que el párrafo anterior. Sin embargo, debido al rápido movimiento de los electrones en la órbita alrededor de la molécula, cuando ocurre que más electrones quedan en un lado de la molécula que en el otro, se forman dipolos temporales, como se sugiere en la figura 2.6*b*). Esos dipolos instantáneos proporcionan una fuerza de atracción entre las moléculas del material.

Por último, el ***enlace de hidrógeno*** sucede en moléculas que contienen átomos de hidrógeno enlazados en forma covalente con otro átomo (por ejemplo, el oxígeno del H_2O). Debido a que los electrones que necesitan completar la capa del átomo de hidrógeno se alinean en un lado de su núcleo, el lado opuesto tiene carga neta positiva que atrae a los electrones de los átomos en las moléculas vecinas. En la figura 2.6*c*) se ilustra el enlace del hidrógeno para el agua, y generalmente es un mecanismo de enlace intermolecular más fuerte que las otras dos formas de enlace secundario. Éste es importante en la formación de muchos polímeros.

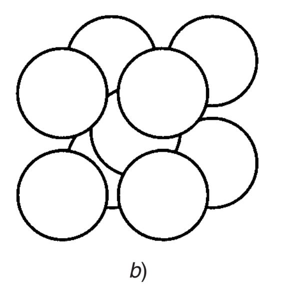
2.3 ESTRUCTURAS CRISTALINAS

Los átomos y moléculas son los bloques de construcción de la mayoría de estructuras macroscópicas de la materia que se considerará en esta sección y la siguiente. Cuando los materiales se solidifican a partir de un estado fundido, tienden a quedar cerca y a empacarse en forma muy comprimida, en muchos casos se arreglan por sí mismos en una estructura muy ordenada y en otros no tanto. Se distinguen dos estructuras materiales diferentes fundamentales: 1) cristalina y 2) no cristalina. En esta sección se estudian las estructuras cristalinas, y en la siguiente las no cristalinas. El video clip acerca del tratamiento térmico muestra la manera en que los metales se arreglan de modo natural en estructuras cristalinas.

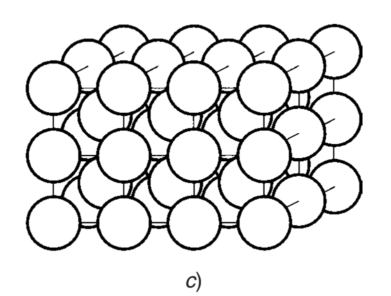
Muchos materiales forman cristales cuando se solidifican a partir de un estado de fusión o líquido. Esto es característico en prácticamente todos los metales, así como de muchas cerámicas y polímeros. Una ***estructura cristalina*** es aquella en la que los átomos se localizan en posiciones regulares y recurrentes en tres dimensiones. El patrón puede repetirse millones de veces dentro de un cristal dado. La estructura puede verse en forma de una ***celda unitaria***, que es el agrupamiento geométrico básico de los átomos y que se repite. Para ilustrar lo anterior, considere el lector la celda unitaria para la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) que se muestra en la figura 2.7, una de las más comunes que se encuentra en los metales. En la figura 2.7*a*) se representa el modelo más simple de la celda unitaria BCC. Aunque este modelo ilustra con claridad las ubicaciones de los átomos dentro de la celda, no indica el empaque tan estrecho de los átomos que tiene lugar en el cristal real, como se ilustra en la figura 2.7*b*).



a)



b)



c)

FIGURA 2.7 Estructura cristalina centrada en el cuerpo (BCC): *a*) celda unitaria, con los átomos indicados como ubicaciones puntuales en un sistema de ejes tridimensionales; *b*) modelo de celda unitaria que muestra a los átomos con un empaque muy estrecho (a veces denominado modelo de bola dura); y *c*) patrón repetido de la estructura BCC.

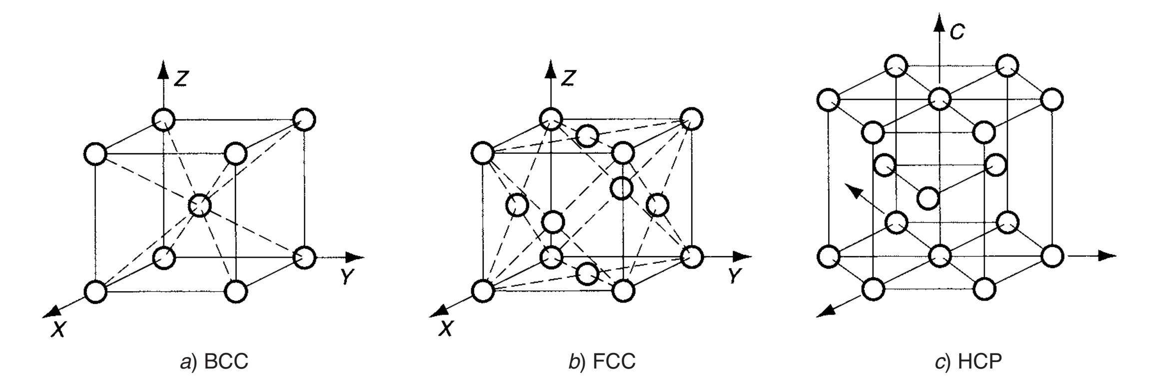


FIGURA 2.8 Tres tipos de estructuras cristalinas en los metales: *a*) cúbica centrada en el cuerpo y *b*) cúbica centrada en las caras, y *c*) hexagonal de empaquetamiento compacto.

En el inciso *c*) de la misma figura se muestra la naturaleza repetitiva de la celda unitaria dentro del cristal.

2.3.1 Tipos de estructuras cristalinas

En los metales son comunes tres tipos de estructuras de red: 1) cúbica centrada en el cuerpo (BCC), 2) cúbica centrada en las caras (FCC), y 3) hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP), como se ilustra en la figura 2.8. En la tabla 2.1 se presentan las estructuras cristalinas de los metales comunes a temperaturas diferentes. Por ejemplo, a temperatura ambiente el hierro es BCC; cambia a FCC por arriba de los 912 ºC (1 674 ºF) y regresa a BCC a temperaturas superiores a 1 400 ºC (2 550 ºF). Cuando un metal (u otro material) cambia su estructura según lo descrito, se le conoce como ***alotrópico***.

2.3.2 Imperfecciones en cristales

Hasta este momento se han estudiado las estructuras cristalinas como si fueran perfectas, la celda unitaria repetida en el material una y otra vez en todas direcciones. En ocasiones, para satisfacer propósitos estéticos o de ingeniería se prefiere un cristal perfecto. Por ejemplo, un diamante perfecto (sin defectos) es más valioso que otro que tenga imperfecciones. En la producción de chips para circuitos integrados, los cristales grandes y únicos de silicio poseen características de procesamiento deseables para formar los detalles microscópicos del patrón del circuito.

Sin embargo, hay varias razones por las que una estructura de red cristalina puede no ser perfecta. Es frecuente que surjan imperfecciones de manera natural debido a la incapacidad del material que se solidifica para continuar sin interrupción la repetición de

TABLA 2.1 Estructuras cristalinas de los metales comunes (a temperatura ambiente).

Cúbica centrado en el cuerpo (BCC)	Cúbica centrada en las caras (FCC)	Hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP)
Cromo (Cr)	Aluminio (Al)	Magnesio (Mg)
Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Titanio (Ti)
Molibdeno (Mo)	Oro (Au)	Zinc (Zn)
Tantalio (Ta)	Plomo (Pb)	
Tungsteno (W)	Plata (Ag)	
	Níquel (Ni)	

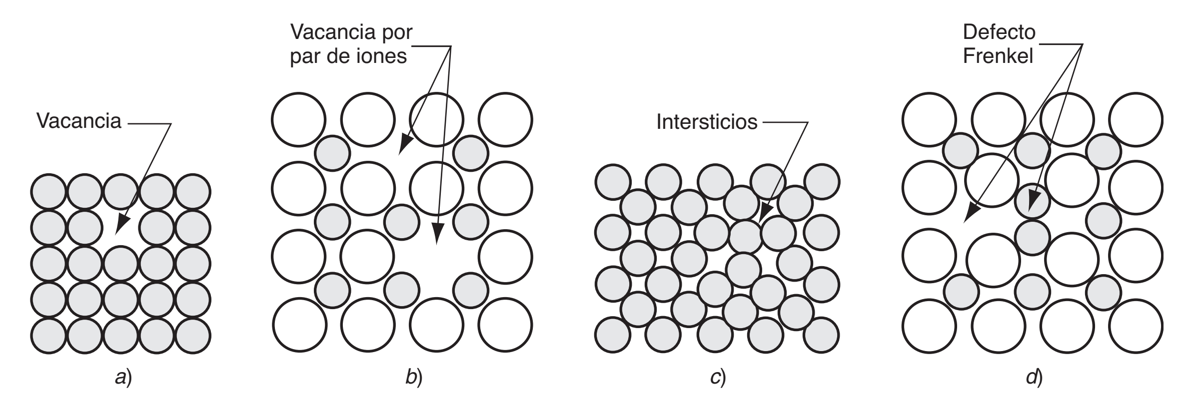


FIGURA 2.9 Defectos puntuales: *a*) vacancia, *b*) vacancia por par de iones, *c*) intersticios, y *d*) desplazamiento iónico.

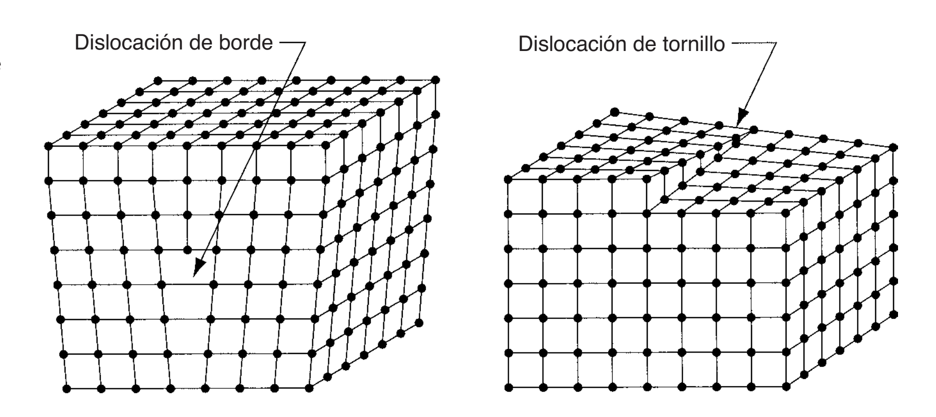
la celda unitaria en forma indefinida. Un ejemplo de esto son los límites de grano de los metales. En otros casos, se introducen imperfecciones a propósito durante el proceso de manufactura, por ejemplo cuando se agrega a un metal un elemento de aleación para incrementar su resistencia.

Las distintas imperfecciones en los sólidos cristalinos también se denominan defectos. Ambos términos, ***imperfección*** o ***defecto***, se refieren a las desviaciones en el patrón regular de la estructura de red cristalina. Se catalogan como 1) defectos puntuales, 2) defectos lineales y 3) defectos superficiales.

Los ***defectos puntuales*** son imperfecciones en la estructura cristalina que involucran ya sea un solo átomo o varios de ellos. Los defectos adoptan varias formas, entre las cuales están las que se ilustran en la figura 2.9: *a*) ***vacancia***, es el defecto más simple, que involucra la falta de un átomo dentro de la estructura de red; *b*) ***vacancia por par de iones***, también llamado ***defecto Schottky***, que incluye un par faltante de iones de carga opuesta en un compuesto que tiene un balance de carga conjunta; *c*) ***intersticios***, distorsión de la red producida por la presencia de un átomo adicional en la estructura; y *d*) ***desplazamiento iónico***, conocido como ***defecto Frenkel***, que ocurre cuando un ion se retira de una posición regular en la estructura de red y se inserta en una posición intersticial cuya ocupación no es normal por parte de dicho ion.

Un ***defecto lineal*** es un grupo conectado de defectos puntuales que forman una línea en la estructura de red. El defecto lineal más importante es la ***dislocación***, que adopta dos formas: *a*) dislocación de borde y *b*) dislocación de tornillo. Una ***dislocación de borde*** es la arista de un plano adicional que existe en la red, como se ilustra en la figura 2.10*a*). Una ***dislocación de tornillo***, véase la figura 2.10*b*), es una espiral dentro de la estructura de red alabeada alrededor de una línea de imperfección, como un tornillo está alabeado alrede-

FIGURA 2.10 Defectos lineales: *a*) dislocación de borde, y *b*) dislocación de tornillo.



dor de su eje. Ambos tipos de dislocaciones surgen en la estructura cristalina durante la solidificación (por ejemplo, fundición), o se inician durante un proceso de deformación (por ejemplo, conformado de metales) que se realice sobre el material sólido. Las dislocaciones son útiles para explicar ciertos aspectos del comportamiento mecánico de los metales.

Los ***defectos superficiales*** son imperfecciones que se extienden en dos direcciones para formar una frontera. El ejemplo más obvio es la superficie externa de un objeto cristalino que define su forma. La superficie es una interrupción de la estructura de red. Las fronteras de la superficie también pueden quedar dentro del material. El mejor ejemplo de estas interrupciones superficiales internas son los límites de grano. Un poco más adelante se estudiarán los granos de los metales, pero primero se considerará la manera en que ocurre la deformación en una red cristalina, y cómo la presencia de dislocaciones favorece este proceso.

2.3.3 La deformación en cristales metálicos

Cuando un cristal se sujeta a fuerzas mecánicas que se incrementan en forma gradual, su respuesta inicial es deformarse de modo ***elástico***. Esto se parece a un alargamiento de la estructura de red sin que haya cambios en la posición de los átomos en la red, en la manera que se ilustra en la figura 2.11*a*) y *b*). Si se elimina la fuerza, la estructura de red (y por tanto el cristal), regresa a su forma original. Si el esfuerzo alcanza un valor alto en relación con las fuerzas electrostáticas que mantienen a los átomos en su lugar dentro de la red, ocurre un cambio permanente en la forma denominado ***deformación plástica***. Lo que ha sucedido es que los átomos en la red se han movido de manera permanente de las posiciones que ocupaban en forma previa, y se ha establecido un equilibrio nuevo en la red, como se sugiere en la figura 2.11*c*).

La deformación de la red que se aprecia en el inciso *c*) de la figura es un posible mecanismo, llamado deslizamiento, con el que puede ocurrir la deformación plástica de una estructura cristalina. El otro se denominan maclas* y se estudiará más adelante.

El ***deslizamiento*** implica el movimiento relativo de los átomos en los lados opuestos de un plano de la red, por lo que se denomina ***plano de deslizamiento***. El plano de deslizamiento debe estar aproximadamente alineado con la estructura red (como se indica en el esquema), por lo que hay ciertas direcciones preferentes a lo largo de las cuales es más probable que ocurra el deslizamiento. El número de estas ***direcciones de deslizamiento*** depende del tipo de red. Las tres estructuras cristalinas comunes son algo más complicadas, en especial en tres dimensiones, que la red cuadrada que se ilustra en la figura 2.11. Se observa que la HCP es la que tiene menos direcciones de deslizamiento, la BCC es la que más, y la FCC está entre ambas. Los metales HCP tienen mala ductilidad y por lo general son difíciles de deformar a temperatura ambiente. Los metales con estructura BCC tendrían la ductilidad mejor si el único criterio fueran el número de las direcciones de deslizamiento. Sin embargo, la naturaleza no es tan simple. Por lo general, esos metales son más fuertes que los demás, lo que complica la situación, y los metales BCC requieren normalmente esfuerzos mayores para que haya deslizamiento. De hecho, algunos de los metales BCC

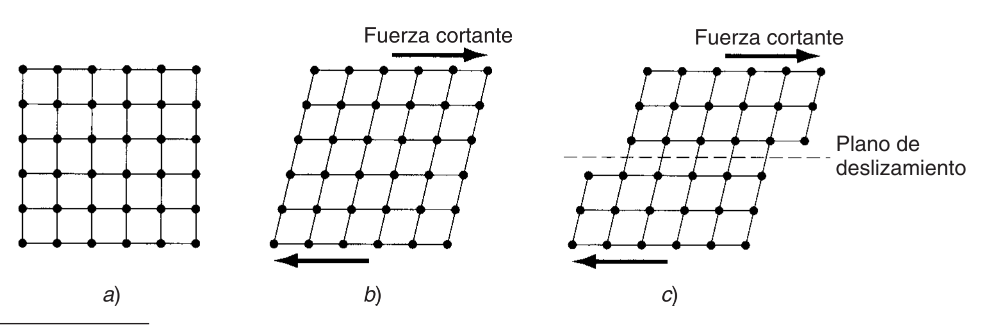


FIGURA 2.11 Deformación de una estructura cristalina: *a*) red original; *b*) deformación elástica, sin cambio permanente de la posición de los átomos; y *c*) deformación plástica, en la que los átomos de la red son forzados para moverse a nuevos "lugares".

* El término *macla* o *gemelo* se emplea en la bibliografía de la cristalografía de minerales. (N. del T.)

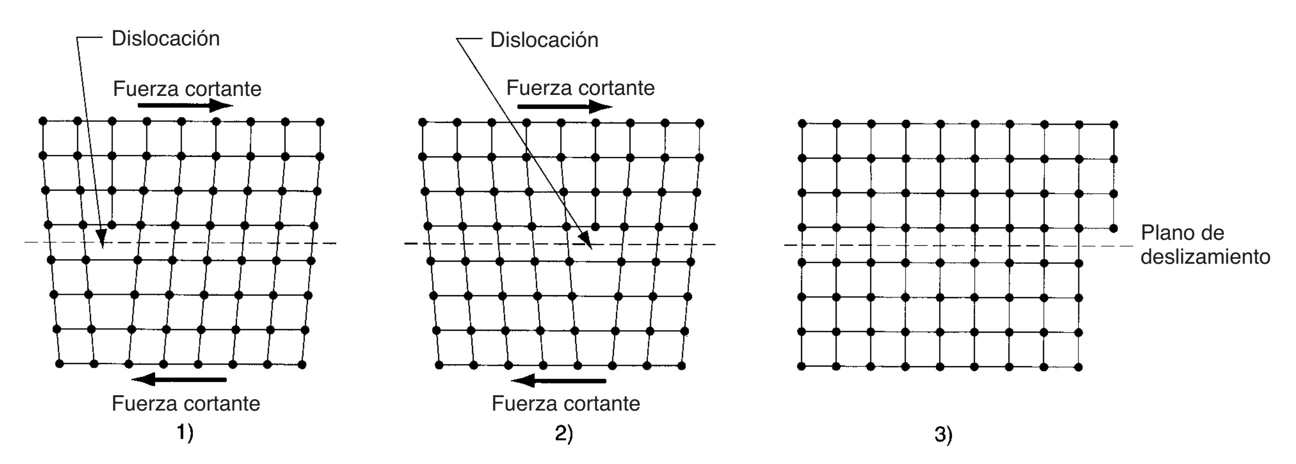


FIGURA 2.12 Efecto de las dislocaciones en la estructura de red bajo esfuerzo. En la serie de diagramas, el movimiento de la dislocación permite que haya deformación en condiciones de esfuerzo menor que en una red perfecta.

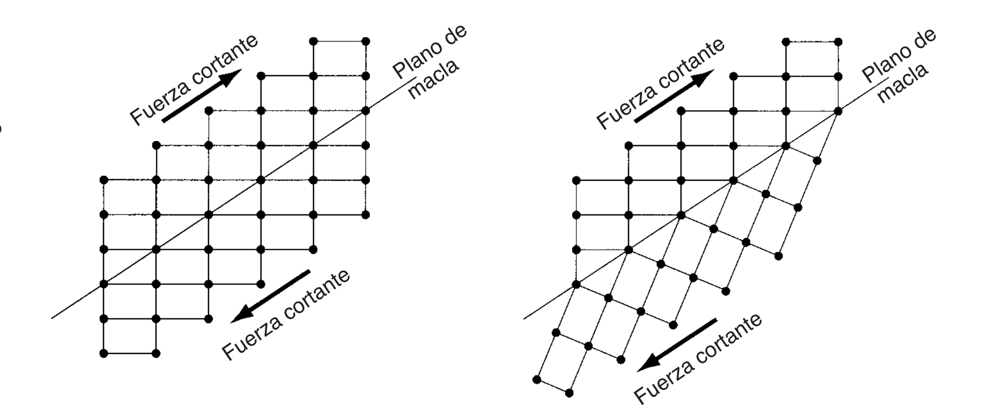
muestran ductilidad mala. Una excepción notable es el acero de bajo carbono aunque es relativamente fuerte, se utiliza mucho con éxito comercial en las operaciones de formado de metal en lámina para las que muestra ductilidad buena. Los metales FCC por lo general son los más dúctiles de las tres estructuras cristalinas, pues combinan un buen número de direcciones de deslizamiento con una resistencia (usualmente) relativamente baja o moderada. A temperaturas elevadas las tres estructuras de los metales se hacen más dúctiles, lo que se aprovecha con frecuencia para darles forma.

Las dislocaciones tienen un papel importante para facilitar el deslizamiento en los metales. Cuando una estructura de red que contiene una dislocación de borde se sujeta a una fuerza cortante, el material se deforma con mucha más facilidad que si se tratara de una estructura perfecta. Esto lo explica el hecho de que la dislocación entra en movimiento dentro de la red cristalina en presencia de la fuerza, como se ilustra en la serie de dibujos de la figura 2.12. ¿Por qué es más fácil mover una dislocación a través de la red de lo que es deformar la red misma? La respuesta es que los átomos en la dislocación de borde requieren un desplazamiento menor dentro de la estructura de red distorsionada a fin de alcanzar una posición nueva de equilibrio. Así, se necesita un nivel de energía menor para volver a alinear los átomos en posiciones nuevas que si la red no tuviera la dislocación. Se requiere entonces un nivel menor de fuerza para realizar la deformación. Debido a que la posición nueva manifiesta una red similar distorsionada, el movimiento de los átomos en la dislocación continúa a un nivel menor de fuerza.

Aquí se han explicado el fenómeno de deslizamiento y la influencia de las dislocaciones sobre una base microscópica. A escala mayor, cuando se somete el metal a una carga deformante el deslizamiento ocurre muchas veces en él, lo que ocasiona el comportamiento macroscópico que nos es familiar. Las dislocaciones representan una situación benéfica y perjudicial. Debido a ellas, el metal es más dúctil y alcanza con más facilidad la deformación plástica (conformado) durante su manufactura. Sin embargo, desde un punto de vista de diseño del producto, el metal no es tan fuerte como lo sería si no hubiera dislocaciones.

El maclado es la otra forma en que los cristales metálicos se deforman plásticamente. El ***maclado*** se define como el mecanismo de deformación plástica en el que los átomos en un lado del plano (llamado plano de macla) cambian para formar una imagen de espejo en el otro lado del plano. Esto se ilustra en la figura 2.13. Este mecanismo es importante en los metales HCP (por ejemplo, magnesio y zinc) debido a que no se deslizan con facilidad. Además de la estructura, otro factor de las maclas es la tasa de deformación. El mecanismo de deslizamiento requiere más tiempo que el del maclado, el cual puede ocurrir en forma casi instantánea. Así, en situaciones en las que la rapidez de deformación es muy alta, los metales que forman maclas se deslizarían. Un ejemplo que ilustra esta sensibilidad a la ra-

FIGURA 2.13 El maclado involucra la formación de una imagen especular atómica (es decir, un "gemelo") en el lado opuesto del plano de macla: *a*) antes, y *b*) después del maclado.



pidez es el acero al bajo carbono; cuando se somete a rapideces de esfuerzo elevadas forma maclas, mientras que a rapideces moderadas se deforma por deslizamiento.

2.3.4 Granos y límites de grano en metales

Un bloque dado de metal contiene millones de cristales individuales, llamados ***granos***. Cada grano tiene su propia orientación de red única; pero en forma colectiva los granos se orientan aleatoriamente dentro del bloque. Una estructura como ésa se denomina ***policristalina***. Es fácil de entender por qué esa clase de estructura es el estado natural del material. Cuando el bloque se enfría a partir de un estado de fusión y comienza a solidificarse, ocurre la formación de núcleos de cristales individuales en posiciones y orientaciones aleatorias a través del líquido. Conforme estos cristales crecen, acaban por interferir unos con otros, y forman en sus interfaces defectos superficiales —el **límite *de grano***. Éste consiste en una zona de transición, quizá con espesor de sólo unos cuantos átomos, en la que los átomos no están alineados con ningún grano.

El tamaño de los granos en el bloque metálico está determinado, entre otros factores, por el número de sitios de formación de núcleos en el material fundido, y por la rapidez de enfriamiento de la masa. En un proceso de fundición, es frecuente que los sitios de formación de núcleos sean creados por las paredes relativamente frías del molde, lo que motiva cierta preferencia de la orientación de los granos en ellas.

El tamaño del grano tiene relación inversa con la rapidez de enfriamiento: el enfriamiento más rápido promueve un tamaño de grano menor, mientas que el enfriamiento lento tiene el efecto opuesto. El tamaño del grano es importante en los metales debido a que afecta las propiedades mecánicas. Desde el punto de vista del diseño, por lo general es preferible un tamaño menor de los granos porque significa resistencia y dureza mayores. También es deseable en ciertas operaciones de manufactura (por ejemplo, conformado de metales), debido a que significa ductilidad mayor durante la deformación y una superficie mejor del producto terminado.

Otro factor que influye en las propiedades mecánicas es la presencia de límites de grano en el metal. Representan imperfecciones en la estructura cristalina que interrumpen el movimiento continuo de las dislocaciones. Esto ayuda a explicar por qué el tamaño menor de los granos —y por tanto mayor abundancia de granos y de sus límites— incrementa la resistencia del metal. Al interferir con el movimiento de dislocación, los límites de los granos también contribuyen con la propiedad característica de un metal de hacerse más fuerte a medida que se deforma. La propiedad a que se hace alusión es el ***endurecimiento por deformación***, que se estudiará más de cerca en el análisis de las propiedades mecánicas, en el capítulo 3.

2.4 ESTRUCTURAS NO CRISTALINAS (AMORFAS)

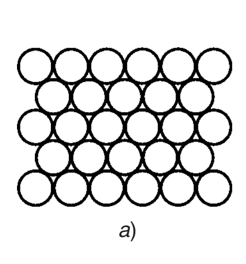
Muchos materiales importantes no son cristalinos —por ejemplo, los líquidos y gases. El agua y el aire no tienen estructuras cristalinas. Un metal pierde su estructura cristalina cuando se funde. A temperatura ambiente, el mercurio es un metal líquido cuyo punto de fusión es de –38 °C (–37 °F). Varias clases importantes de materiales de ingeniería tienen formas no cristalinas en su estado sólido, es frecuente que se utilice el término ***amorfo*** para describirlos. El vidrio, muchos plásticos y el caucho pertenecen a esta categoría. Muchos plásticos importantes son mezclas de formas cristalinas y no cristalinas. Incluso los metales pueden ser amorfos en vez de cristalinos, si la rapidez de enfriamiento durante su paso de líquido a sólido es lo suficientemente rápida como para inhibir que los átomos se acomoden por sí mismos en sus patrones regulares preferidos. Por ejemplo, esto ocurre si el metal fundido se vierte entre rodillos giratorios fríos poco espaciados.

Dos características relacionadas con las diferencias de los materiales no cristalinos de los cristalinos: 1) la ausencia de un orden de largo alcance en la estructura molecular de un material no cristalino, y 2) las diferencias entre las características de la fusión y la expansión térmica.

La diferencia en la estructura molecular se puede visualizar con ayuda de la figura 2.14. El empaquetamiento compacto y el patrón de repetición de la estructura cristalina se muestra en el lado izquierdo; y en el derecho aparece el arreglo menos denso y aleatorio de los átomos en el material no cristalino. La diferencia se manifiesta cuando el metal se funde. Uno de los efectos es que en el metal fundido el empaque más espaciado de los átomos muestra un incremento del volumen (reducción de la densidad) en comparación con el estado cristalino sólido del material. Este efecto es característico de la mayoría de los materiales cuando se funden (una excepción notable es el hielo; el agua líquida es más densa que el hielo en estado sólido). Una característica general de los líquidos y los materiales sólidos amorfos es que están ausentes de un orden de largo alcance, como el del lado derecho de la figura.

Ahora se examinará en detalle el fenómeno de la fusión, y al hacerlo se definirá la segunda diferencia importante entre las estructuras cristalinas y las no cristalinas. Como ya se dijo, un metal experimenta un aumento de su volumen cuando se funde y pasa del estado sólido al líquido. Para un metal puro, este cambio volumétrico no ocurre en forma abrupta, a temperatura constante (es decir, la temperatura de fusión T_m), como se indica en la figura 2.15. El cambio representa una discontinuidad desde las pendientes en cada lado de la gráfica. Las pendientes graduales caracterizan la ***expansión térmica*** del metal —el cambio del volumen como función de la temperatura, que usualmente es diferente en los estados sólido y líquido. Asociado con el incremento súbito del volumen conforme el metal pasa de sólido a líquido en el punto de fusión, está la adición de cierta cantidad de calor, llamada ***calor de fusión***, que ocasiona que los átomos pierdan el arreglo denso y regular de la estructura cristalina. El proceso es reversible; opera en ambas direcciones. Si el metal fundido se enfría a través de su temperatura de fusión, ocurre el mismo cambio abrupto en el volumen (excepto que se tata una disminución), y el metal libera la misma cantidad de calor.

Un material amorfo presenta un comportamiento muy diferente al de un metal puro cuando cambia de sólido a líquido, como se aprecia en la figura 2.15. El proceso es,



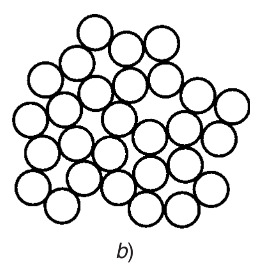


FIGURA 2.14 Ilustración de la diferencia de estructura entre materiales: *a*) cristalino, y *b*) no cristalino. La estructura cristalina es regular, repetitiva y más densa, en tanto que la no cristalina tiene un menor empaquetamiento y es aleatoria.

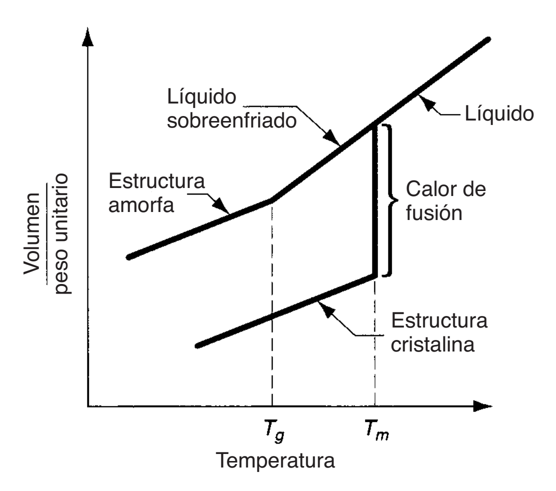


FIGURA 2.15 Cambio característico de volumen para un metal puro (estructura cristalina), en comparación con los mismos cambios volumétricos del vidrio (estructura no cristalina).

otra vez, reversible, y a continuación se analizará el comportamiento del material amorfo sólido, como se hizo antes. Para ilustrarlo se empleará vidrio (sílice, SiO_2). A temperaturas elevadas, el vidrio es un líquido verdadero, y sus moléculas son libres de moverse de acuerdo con la definición usual de un líquido. Conforme el vidrio se enfría, pasa en forma gradual al estado sólido, a través de una fase de transición, llamada ***líquido sobreenfriado***, antes de quedar, por fin, rígido. No muestra el cambio volumétrico súbito característico de los materiales cristalinos; en vez de ello cruza su temperatura de fusión T_m sin cambiar su pendiente de expansión térmica. En esa región de líquido sobreenfriado, el material se hace cada vez más viscoso conforme la temperatura disminuye. Al enfriarse aún más, se alcanza un punto en el que el líquido sobreenfriado se convierte en sólido. Esto se denomina ***temperatura de transición vítrea***, T_g. En ese momento, hay un cambio en la pendiente de la expansión térmica (es más preciso hablar de pendiente de contracción térmica; sin embargo, la pendiente es la misma para la expansión que para la contracción). La tasa de expansión térmica es más baja para el material sólido que para el líquido sobreenfriado.

La diferencia de comportamiento entre los materiales cristalinos y no cristalinos se debe a la respuesta de sus estructuras atómicas respectivas ante los cambios de temperatura. Cuando un metal puro se solidifica desde el estado de fusión, los átomos se arreglan por sí solos en una estructura regular y recurrente. Dicha estructura cristalina es mucho más compacta que el líquido aleatorio con empaquetamiento holgado del cual se formó. Así, para un material cristalino, el proceso de solidificación produce la contracción volumétrica abrupta que se observa en la figura 2.15. En contraste, a bajas temperaturas los materiales amorfos no alcanzan esa estructura estrechamente empaquetada y repetitiva. La estructura atómica es el mismo arreglo aleatorio que en el estado líquido; así, no hay cambio abrupto del volumen cuando esos materiales pasan de líquido a sólido.

2.5 MATERIALES DE INGENIERÍA

Ahora se hará un resumen de la manera en que la estructura atómica, enlaces y estructura cristalina (o ausencia de ésta), se relacionan con el tipo de material de ingeniería —metales, cerámicas y polímeros—.

Metales En estado sólido, los metales tienen estructuras cristalinas, casi sin excepción. Las celdas unitarias de dichas estructuras cristalinas siempre son BCC, FCC o HCP. Los átomos de los metales se mantienen unidos por medio de un enlace metálico, lo que significa que sus electrones de valencia pueden moverse con libertad relativa (en comparación con

los otros tipos de enlace atómico y molecular). Por lo general, estas estructuras y enlaces hacen que los metales sean fuertes y duros. Muchos de los metales son dúctiles (tienen la capacidad de deformarse, lo que es útil para la manufactura), en especial los metales FCC. Otras propiedades generales de los metales que se relacionan con su estructura y su enlace son las siguientes: conductividad térmica y eléctrica elevadas, opacidad (impenetrables al paso de la luz), y reflectividad (capacidad de reflejar la luz).

Cerámicos Los átomos de los cerámicos se caracterizan por tener enlaces iónicos o covalentes, o ambos. Los átomos metálicos liberan o comparten sus electrones exteriores con los átomos no metálicos, y existe una fuerza de atracción grande dentro de las moléculas. Las propiedades generales que resultan de estos mecanismos de enlace incluyen: dureza y rigidez elevadas (aun a temperaturas elevadas), fragilidad (no son dúctiles), eléctricamente aislantes (no conductores), refractarios (térmicamente resistentes), y químicamente inertes.

Los cerámicos poseen estructura ya sea cristalina o no cristalina. La mayor parte de los cerámicos tienen estructura critalina, mientras que el vidrios con base en el sílice (SiO_2) son amorfos. En ciertos casos, en el mismo material cerámico puede existir cualquier estructura. Por ejemplo, en la naturaleza el sílice ocurre como cuarzo cristalino. Cuando este mineral se funde y luego se enfría, se solidifica para formar sílice fundido, que tiene estructura no cristalina.

Polímeros Una molécula de polímero consiste en muchos ***meros*** que forman moléculas muy grandes que se mantienen unidas por medio de enlaces covalentes. Por lo general, los elementos de un polímero consisten en carbono más uno o más elementos tales como el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cloro. Un enlace secundario (de Van der Waals) mantiene juntas a las moléculas dentro del material agregado (enlace intermolecular). Los polímeros tienen ya sea una estructura vítrea o una mezcla de vítrea y cristalina. Hay diferencias entre los tres tipos de polímero. En los ***polímeros termoplásticos***, las moléculas consisten en cadenas largas de meros con estructura lineal. Estos materiales pueden calentarse y enfriarse sin que se altere sustancialmente su estructura lineal. En los ***polímeros termoestables (termofijos)***, las moléculas se transforman en una estructura rígida y tridimensional al enfriarse a partir de su condición de plástico caliente. Si los polímetros termoestables se vuelven a calentar, se degradan químicamente en lugar de suavizarse. Los ***elastómeros*** tienen moléculas grandes con estructuras engarzadas Al estirar y volver a engarzar las moléculas cuando se las sujeta a fuerzas cíclicas, se motiva que el material agregado manifieste su comportamiento elástico característico.

La estructura y enlace molecular de los polímeros les da las propiedades comunes siguientes: baja densidad, resistividad eléctrica elevada (algunos polímeros se utilizan como aislantes), y baja conductividad térmica. La resistencia y rigidez de los polímeros varía mucho. Algunos son fuertes y rígidos (aunque no igualan la fuerza y rigidez de los metales o cerámicos), mientras que otros muestran un comportamiento muy elástico.

REFERENCIAS

[1] Dieter, G. E. ***Mechanical Metallurgy***, 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1986.

[2] Flinn, R. A., y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[3] Guy, A. G., y Hren., J. J. ***Elements of Physical Metallurgy***, 3a. ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading Mass., 1974.

[4] Van Vlack, L. H. ***Elements of Materials Science and Engineering***, 6a. ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

2.1. Los elementos de la tabla periódica se dividen en tres categorías. ¿Cuáles son esas categorías? Dé tres ejemplos de cada una.
2.2. ¿Cuáles elementos son los metales nobles?
2.3. ¿Cuál es la diferencia entre los enlaces primarios y los secundarios en la estructura de los materiales?
2.4. Describa cómo funciona el enlace iónico.
2.5. ¿Cuál es la diferencia entre las estructuras cristalinas y las no cristalinas de los materiales?
2.6. ¿Cuáles son algunos defectos puntuales comunes en una estructura de red cristalina?
2.7. Defina la diferencia entre la deformación elástica y la plástica en términos del efecto sobre la estructura de red cristalina.
2.8. ¿Cómo contribuyen los límites de grano entre los granos al fenómeno del endurecimiento por deformación de los metales?
2.9. Identifique algunos materiales con estructura cristalina.
2.10. Mencione algunos materiales que tengan estructura no cristalina.
2.11. ¿Cuál es la diferencia fundamental en el proceso de solidificación (o fusión) entre las estructuras cristalinas y las no cristalinas?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 20 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

2.1. ¿Cuál de los siguientes es la unidad estructural básica de la materia?: *a*) átomo, *b*) electrón, *c*) elemento, *d*) molécula, o *e*) núcleo.
2.2. ¿Aproximadamente cuántos elementos distintos se han identificado? (una respuesta es la mejor): *a*) 10, *b*) 50, *c*) 100, *d*) 200, o *e*) 500.
2.3. ¿En la tabla periódica, los elementos pueden dividirse en cuál de las categorías siguientes? (hay tres respuestas mejores): *a*) cerámicos, *b*) gases, *c*) líquidos, *d*) metales, *e*) no metales, *f*) polímeros, *g*) semimetales, y *h*) sólidos.
2.4. ¿Cuál de los siguientes es el elemento con menor densidad y peso atómico más pequeño?: *a*) aluminio, *b*) argón, *c*) helio, *d*) hidrógeno, o *e*) magnesio.
2.5. ¿Cuáles de los siguientes tipos de enlace se clasifican como primarios? (hay tres respuestas correctas): *a*) enlace covalente, *b*) enlace del hidrógeno, *c*) enlace iónico, *d*) enlace metálico, y *e*) fuerzas de Van der Waals.
2.6. ¿Cuántos átomos hay en la celda unitaria cúbica centrada en las caras (FCC)? (una respuesta correcta): *a*) 8, *b*) 9, *c*) 10, *d*) 12, o *e*) 14.
2.7. ¿Cuáles de los siguientes no son defectos puntuales en una estructura de red cristalina? (hay tres respuestas correctas): *a*) dislocación de borde, *b*) intersticios, *c*) defecto Schottky, y *d*) vacancia.
2.8. ¿Cuáles de las siguientes estructuras cristalinas tienen menos direcciones de deslizamiento y por tanto los metales con esa estructura por lo general son más difíciles de deformar a temperatura ambiente?: *a*) BCC, *b*) FCC, o *c*) HCP.
2.9. ¿Los límites de grano son un ejemplo de cuál de los tipos siguientes de defectos en la estructura cristalina?: *a*) dislocación, *b*) defecto Frenkel, *c*) defectos lineales, *d*) defectos puntuales, o *e*) defectos superficiales.
2.10. ¿Cuál de las respuestas siguientes corresponde al maclado? (tres respuestas): *a*) deformación elástica, *b*) mecanismo de deformación plástica, *c*) es más probable a altas tasas de deformación, *d*) es más probable en los metales con estructura HCP, *e*) mecanismo de deslizamiento, y *f*) tipo de dislocación.
2.11. ¿Los polímeros se caracterizan por cuáles de los siguientes tipos de enlace? (dos respuestas correctas): *a*) adhesivo, *b*) covalente, *c*) de hidrógeno, *d*) iónico, *e*) metálico, y *f*) Van der Waals.

3

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Las propiedades mecánicas de un material determinan su comportamiento cuando se le sujeta a esfuerzos mecánicos. Estas propiedades incluyen el módulo de elasticidad, ductilidad, dureza y distintas medidas de la resistencia. Las propiedades mecánicas son importantes en el diseño porque el funcionamiento y rendimiento de un producto dependen de su capacidad para resistir la deformación ante los esfuerzos a que se le somete durante su uso. En el diseño, el objetivo usual del producto y sus componentes consiste en resistir dichos esfuerzos sin que su geometría cambie en forma significativa. Esta capacidad depende de propiedades tales como el módulo de elasticidad y la resistencia a la deformación. En la manufactura el objetivo es el opuesto. En ella se desea aplicar esfuerzos que excedan la resistencia a la deformación del material a fin de alterar su forma. Procesos mecánicos tales como el conformado y el maquinado tienen éxito gracias al desarrollo de fuerzas que excedan la resistencia del material ante la deformación. Así, se tiene el dilema siguiente: las propiedades mecánicas que resultan deseables para el diseñador, como resistencia elevada, por lo general hacen que la manufactura del producto sea más difícil. Es útil para el ingeniero de manufactura apreciar el punto de vista del diseño, y para el diseñador tomar en cuenta el de la manufactura.

En este capítulo se estudian las propiedades mecánicas de los materiales. Las limitaciones de alcance y espacio nos fuerzan a considerar sólo aquellas propiedades que son más relevantes para la manufactura.

3.1 RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Existen tres tipos de esfuerzo estáticos a los que se sujetan los materiales: tensión, compresión y cortante. Los esfuerzos de tensión tienden a estirar al material, las de compresión a compactarlo, y las cortantes comprenden tensiones que tienden a ocasionar que porciones adyacentes del material se deslicen una respecto a la otra. La curva esfuerzo-deformación es la relación básica que describe las propiedades mecánicas para los tres tipos.

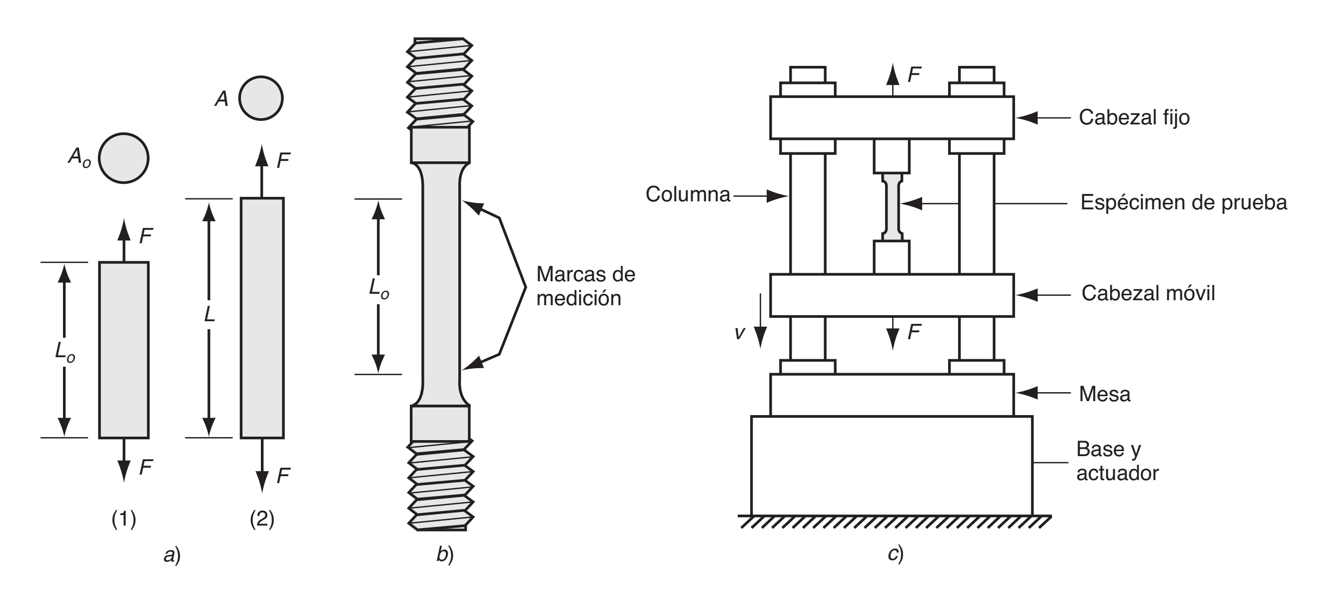
3.1.1 Propiedades ante la tensión

La prueba de tensión es el procedimiento más común para estudiar la relación esfuerzo-deformación, en particular para los metales. Durante la prueba, se aplica una fuerza que tira del material y tiende a estirarlo y reducir su diámetro, como se ilustra en la figura 3.1*a*). Los estándares de la ASTM (American Society for Testing and Materials) especifican el modo de preparación del espécimen de prueba y de la realización de la prueba misma. En la figura 3.1*b*) y *c*) se ilustran el espécimen común y la preparación general de la prueba, respectivamente.

El ejemplar con que se inicia la prueba tiene una longitud original L_o y un área A_o. La longitud se mide como la distancia entre las marcas de medición, y el área como la sección transversal (circular, por lo general) del espécimen. Durante la prueba de un metal, el ejemplar se estira, luego le aparece un estrangulamiento y por último se fractura, como se muestra en la figura 3.2. La carga y el cambio de longitud del espécimen se registran conforme la prueba se efectúa a fin de obtener los datos que se requieren para determinar la relación esfuerzo-deformación. Hay dos tipos diferentes de curvas esfuerzo-deformación: 1) la curva de esfuerzo-deformación de ingeniería, y 2) la de esfuerzo-deformación verdadera. La primera es más importante para el diseño, y la segunda lo es para la manufactura.

Esfuerzo-deformación de ingeniería El esfuerzo deformación de ingeniería en una prueba de tensión que se define en relación con el área y longitud originales del espécimen de prueba. Dichos valores son de interés en el diseño debido a que el diseñador espera

FIGURA 3.1 Prueba de tensión: *a*) la fuerza de tensión que se aplica en 1) y 2) da como resultado el estiramiento del material; *b*) espécimen de prueba común; y *c*) disposición de la prueba de tensión.



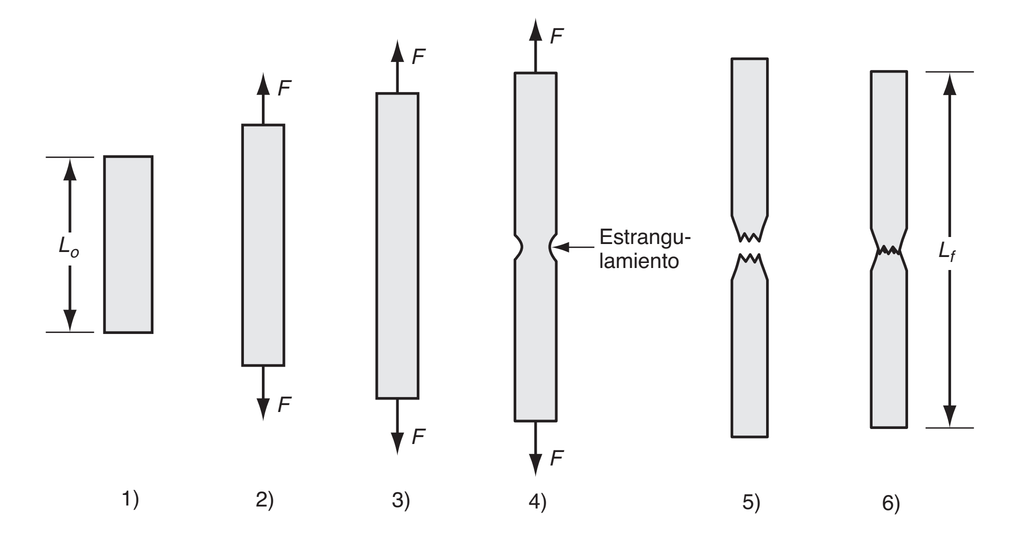


FIGURA 3.2 Desarrollo común de una prueba de tensión: 1) inicio de la prueba, sin carga; 2) estiramiento uniforme y reducción del área de la sección transversal; 3) continuación del estiramiento, se alcanza la carga máxima; 4) formación de un estrangulamiento, la carga comienza a disminuir; y 5) fractura. Si los elementos se unen como se ilustra en 6), es posible medir la longitud final.

que las tensiones-deformaciones experimentadas por cualquier componente del producto no cambiarán su forma de manera significativa. Los componentes están diseñados para soportar los esfuerzos que se prevé encontrarán durante su uso.

En la figura 3.3 se ilustra una curva común del esfuerzo-deformación de ingeniería de una prueba de tensión de un espécimen metálico. El ***esfuerzo de ingeniería*** en cualquier punto de la curva se define como la fuerza dividida entre el área original:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_o} \tag{3.1}$$

donde σ_e = esfuerzo de ingeniería, MPa (lb/in^2), F = fuerza aplicada durante la prueba, N (lb), y A_o = área original del espécimen de prueba, mm^2 (in^2). La ***deformación de ingeniería***

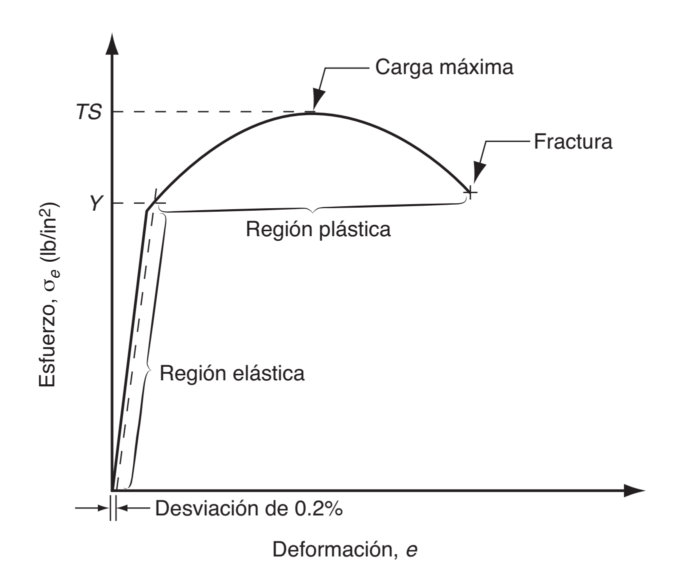


FIGURA 3.3 Gráfica normal del esfuerzo-deformación de ingeniería durante una prueba de tensión de un metal.

TABLA 3.1 Módulo de elasticidad para materiales seleccionados.

	Módulo de elasticidad			Módulo de elasticidad	
Metales	MPa	lb/in²	Cerámicas y polímeros	MPa	lb/in²
Aluminio y sus aleaciones	69×10^3	10×10^6	Alúmina	345×10^3	50×10^6
Hierro colado	138×10^3	20×10^6	Diamante[a]	1035×10^3	150×10^6
Cobre y sus aleaciones	110×10^3	16×10^6	Vidrio plano	69×10^3	10×10^6
Hierro	209×10^3	30×10^6	Carburo de silicio	448×10^3	65×10^6
Plomo	21×10^3	3×10^6	Carburo de tungsteno	552×10^3	80×10^6
Magnesio	48×10^3	7×10^6	Nailon	3.0×10^3	0.40×10^6
Níquel	209×10^3	30×10^6	Fenol formaldehído	7.0×10^3	1.00×10^6
Acero	209×10^3	30×10^6	Polietileno (de baja densidad)	0.2×10^3	0.03×10^6
Titanio	117×10^3	17×10^6	Polietileno (de alta densidad)	0.7×10^3	0.10×10^6
Tungsteno	407×10^3	59×10^6	Poliestireno	3.0×10^3	0.40×10^6

Compilado de las referencias [8], [10], [11], [14], [15] y otras fuentes.
Aunque el diamante no es una cerámica, con frecuencia se le compara con esos materiales.

en cualquier punto de la prueba está dada por

$$e = \frac{L - L_O}{L_O} \tag{3.2}$$

donde e = deformación de ingeniería, mm/mm (in/in); L = longitud en cualquier punto durante el estiramiento, mm (in); y L_o = longitud de medición original, mm (in). Las unidades de la deformación de ingeniería se dan como mm/mm (in/in), pero puede concebirse que representan estiramiento por unidad de longitud, sin unidades.

La relación esfuerzo-deformación de la figura 3.3 tiene dos regiones que indican dos modos distintos de comportamiento: 1) elástico y 2) plástico. En la región elástica, la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal, y el material muestra un comportamiento elástico porque regresa a su longitud original si la carga (esfuerzo) se interrumpe. La relación está definida por la ***ley de Hooke:***

$$\sigma_e = Ee \tag{3.3}$$

donde E = ***módulo de elasticidad***, MPA (lb/in²). E es una medida de la rigidez inherente del material. Es una constante de proporcionalidad cuyo valor es diferente para materiales distintos. En la tabla 3.1 se presentan valores comunes para varios materiales, metales y no metales.

Conforme el esfuerzo aumenta, se alcanza un punto final en la relación lineal en el que el material comienza a ceder. Ese ***punto de deformación***, Y, del material se identifica en la figura por el cambio de la pendiente al final de la región lineal. Debido a que el comienzo de la deformación por lo general es difícil de ver en una gráfica de datos de prueba (por lo general no ocurre como un cambio abrupto de la pendiente), es común definir a Y como el esfuerzo con el que ocurre un avance de la deformación del 0.2% a partir de la línea recta. En forma más específica, es el punto en el que la curva esfuerzo-deformación del material interseca una recta paralela a la porción recta de la curva, pero desviada de ella por una deformación de 0.2%. El punto de deformación es una característica de la resistencia del material, y por ello es frecuente hacer referencia a él como el ***límite de deformación*** (otros nombres que recibe son ***esfuerzo de deformación*** y ***límite elástico***).

El punto de deformación marca la transición hacia la región plástica y el comienzo de la deformación plástica del material. La relación entre el esfuerzo y la deformación ya no estará determinada por la ley de Hooke. Conforme se incrementa la carga más allá del punto de deformación, continúa la elongación del material, pero a una tasa mucho más rápida que la anterior, como se aprecia en la figura 3.3. La elongación va acompañada de una reducción uniforme del área de la sección transversal, consistente con el mantenimiento de un volumen constante. Por último, la carga aplicada F alcanza un valor máximo, y el

TABLA 3.2 Resistencia de vencimiento y resistencia a la tensión de metales seleccionados.

	Resistencia de deformación		Resistencia a la tensión			Resistencia de deformación		Resistencia a la tensión	
Metal	MPa	lb/in²	MPa	lb/in²	Metal	MPa	lb/in²	MPa	lb/in²
Aluminio, templado	28	4000	69	10000	Níquel, templado	150	22000	450	65000
Aluminio, CW[a]	105	15000	125	18000	Acero, bajo C[a]	175	25000	300	45000
Aleaciones de aluminio[a]	175	25000	350	50000	Acero, alto C[a]	400	60000	600	90000
Hierro colado[a]	275	40000	275	40000	Acero, aleaciones[a]	500	75000	700	100000
Cobre, templado	70	10000	205	30000	Acero, inoxidable[a]	275	40000	650	95000
Aleaciones de cobre[a]	205	30000	410	60000	Titanio, puro	350	50000	515	75000
Aleaciones de magnesio[a]	175	25000	275	40000	Aleaciones de titanio	800	120000	900	130 000

Compilada a partir de las referencias [8], [10], [11], [15] y otras fuentes.

[a] Los valores dados son comunes. Para las aleaciones, hay un rango amplio de los valores de resistencia, en función de su composición y tratamiento (por ejemplo, tratamiento térmico, y endurecimiento por trabajo).

esfuerzo de ingeniería calculado en ese punto se denomina ***resistencia a la tensión*** o ***resistencia final a la tensión*** del material. Se denota como TS, donde $TS = F_{máx}/A_o$. TS e Y son propiedades importantes de la resistencia para los cálculos del diseño (también se les usa para hacer los de manufactura). En la tabla 3.2 se enlistan algunos valores comunes de la resistencia a la deformación y resistencia a la tensión para metales seleccionados. Las pruebas convencionales de resistencia a la tensión son difíciles de hacer para las cerámicas, y se emplea una prueba alternativa para medir la resistencia de esos materiales frágiles (véase la sección 3.1.3). Los polímeros difieren de los metales y las cerámicas en sus propiedades de resistencia debido a la plasticidad (véase la sección 3.5).

A la derecha de la resistencia a la tensión, en la curva esfuerzo-deformación, la carga comienza a declinar y es común que el espécimen de prueba comience un proceso de elongación localizada que se conoce como ***estrangulamiento***. En lugar de continuar la deformación uniforme a todo lo largo de su longitud, comienza a concentrarse la deformación en una sección pequeña del espécimen. El área de esa sección se angosta (se estrangula) de manera significativa hasta que sobreviene la falla. El esfuerzo calculado inmediatamente antes de la falla se conoce como ***esfuerzo de fractura***.

La cantidad de deformación que el material es capaz de soportar antes de que ocurra la falla también es una propiedad mecánica de interés para muchos procesos de manufactura. La medición común de esta propiedad es la ***ductilidad***, que es la capacidad que tiene un material para deformarse plásticamente sin sufrir una fractura. Esta medición se toma ya sea como elongación o como reducción del área. La elongación se define como

$$EL = \frac{L_f - L_o}{L_o} \tag{3.4}$$

donde EL = elongación, que de manera frecuente se expresa como un porcentaje; L_f = longitud del espécimen al ocurrir la fractura, mm (in), medida como la distancia entre las marcas de medición después de que las dos partes del espécimen se han vuelto a unir; y L_o = longitud original del espécimen, mm (in). La reducción del área se define como

$$AR = \frac{A_o - A_f}{A_o} \tag{3.5}$$

donde AR = reducción del área, que se expresa con frecuencia como porcentaje; A_f = área de la sección transversal en el punto de fractura, mm² (in²); y A_o = área original, mm² (in²). Existen problemas con estas dos mediciones de ductilidad debido al estrangulamiento que ocurre en los especímenes de prueba metálicos y el efecto no uniforme asociado con la elongación y la reducción del área. A pesar de esas dificultades, la elongación y la reducción porcentual del área son las medidas de la ductilidad que se emplean con mayor frecuencia en la práctica de la ingeniería. Algunos valores frecuentes del porcentaje de elongación para distintos materiales (sobre todo metales) se enlistan en la tabla 3.3.

TABLA 3.3 Ductilidad como % de elongación (valores frecuentes) para varios materiales seleccionados.

Material	Elongación	Material	Elongación
Metales		***Metales, continuación***	
Aluminio recocido	40%	Acero, bajo C[a]	30%
Aluminio, trabajado en frío	8%	Acero, alto C[a]	10%
Aleaciones de aluminio, templadas[a]	20%	Acero, aleación[a]	20%
Aleaciones de aluminio, tratadas con calor[a]	8%	Acero, inoxidable, austenítico[a]	55%
Aleaciones de aluminio, fundidas[a]	4%	Titanio, casi puro	20%
Hierro colado, gris[a]	0.6%	Aleación de zinc	10%
Cobre, templado	45%	***Cerámicas***	0[b]
Cobre, trabajado en frío	10%	***Polímeros***	
Aleación de cobre: latón, templado	60%	Polímeros termoplásticos	100%
Aleaciones de magnesio[a]	10%	Polímeros termoestables	1%
Níquel, templado	45%	Elastómeros (por ejemplo, caucho)	1%[c]

Compilado a partir de las referencias [8], [10], [11], [15], y de otras fuentes.

[a] Los valores dados son comunes. Para las aleaciones, hay un rango de ductilidad que depende de la composición y el tratamiento (por ejemplo, tratamiento con calor y grado de endurecimiento por trabajo).

[b] Los materiales cerámicos son frágiles; muestran deformación elástica pero virtualmente ninguna plástica.

[c] Los elastómeros soportan bastante deformación elástica, pero su deformación plástica es muy limitada, lo común es de sólo 1%, aproximadamente.

Esfuerzo-deformación verdadero Los lectores acuciosos quizás hayan tenido problemas por el uso del área original del espécimen de prueba para calcular los esfuerzos de ingeniería, en lugar del área real (instantánea) que es cada vez más pequeña conforme la prueba avanza. Si se utilizara el área real, los esfuerzos calculados serían mayores. El valor del esfuerzo que se obtiene al dividir la carga aplicada entre el valor instantáneo del área se define como ***esfuerzo verdadero***:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.6}$$

donde σ = esfuerzo verdadero, MPa (lb/in^2); F = fuerza, N(lb); y A = área real (instantánea) que resiste la carga, mm^2 (in^2).

De manera similar, la ***deformación verdadera*** proporciona una evaluación más realista de la elongación "instantánea" por unidad de longitud del material. El valor de la deformación verdadera en una prueba de tensión se estima por medio de dividir la elongación total en incrementos pequeños, el cálculo de la deformación de ingeniería para cada incremento sobre la base de su longitud inicial, y después con la suma de los valores de la deformación. En el límite, la deformación verdadera se define como

$$\epsilon = \int_{L_o}^{L} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_o} \tag{3.7}$$

donde L = longitud instantánea en cualquier momento durante la elongación. Al final de la prueba (u otra deformación), el valor final de la deformación se calcula con el uso de $L = L_f$.

Cuando se grafican los datos del esfuerzo-deformación de ingeniería de la figura 3.3, con el empleo de los valores del esfuerzo y la deformación verdaderos, la curva que resulta tiene la apariencia de la que se muestra en la figura 3.4. En la región elástica, la gráfica es virtualmente la misma de antes. Los valores de la deformación son pequeños y la deformación verdadera es casi igual a la de ingeniería para la mayor parte de los metales de interés. Los valores de esfuerzo respectivos también están muy cerca el uno del otro. La razón de estas casi igualdades es que el área de la sección transversal del espécimen de prueba no se reduce significativamente en la región elástica. Así, puede utilizarse la ley de Hooke para relacionar el esfuerzo verdadero con la deformación verdadera: $\sigma = E\epsilon$.

La diferencia entre la curva esfuerzo-deformación verdaderos y su contraparte de ingeniería se encuentra en la región plástica. Los valores del esfuerzo son mayores en la región plástica porque en el cálculo ahora se emplea el área instantánea de la sección transversal del espécimen, que se redujo continuamente durante la elongación. Como en la curva anterior, al final ocurre una caída como resultado del estrangulamiento. En la figura

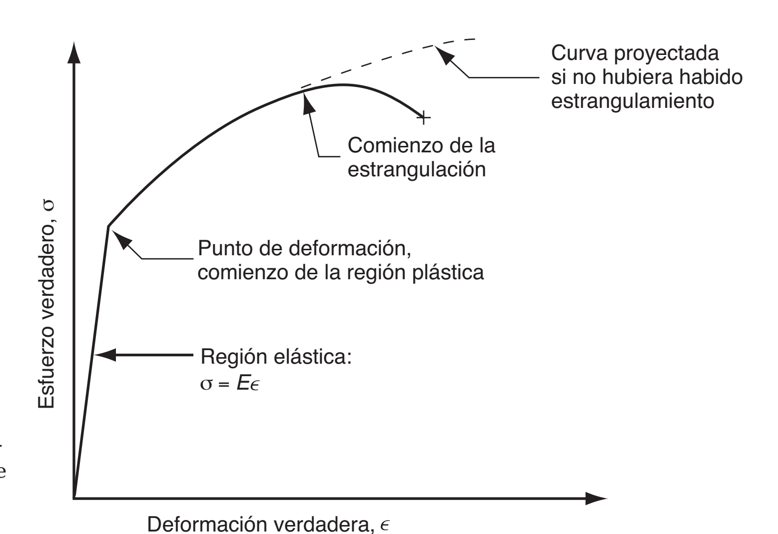


FIGURA 3.4 Curva esfuerzo-deformación verdaderos, para la gráfica anterior de esfuerzo-deformación de ingeniería que se muestra en la figura 3.3.

se utiliza una línea punteada para indicar la continuación proyectada de la gráfica esfuerzo-deformación verdaderos, si no hubiera habido estrangulamiento.

Conforme la deformación se hace significativa en la región plástica, los valores de la deformación verdadera y de ingeniería divergen. La deformación verdadera se relaciona con la correspondiente de ingeniería por medio de

$$\epsilon = \ln(1+e) \tag{3.8}$$

De manera similar, el esfuerzo verdadero y el de ingeniería se relacionan con la expresión

$$\sigma = \sigma_e(1+e) \tag{3.9}$$

En la figura 3.4, debe notarse que en la región plástica el esfuerzo se incrementa en forma continua hasta que comienza el estrangulamiento. Cuando esto pasaba en la curva de esfuerzo-deformación de ingeniería, su significancia se perdía porque para calcular el esfuerzo se había utilizado un valor de área que se sabía erróneo. Ahora, cuando el esfuerzo verdadero también se incrementa, no se puede ignorar tan a la ligera. Lo que eso significa es que el metal se está haciendo más fuerte conforme la deformación aumenta. Esta propiedad se denomina ***endurecimiento por deformación***, que se mencionó en el capítulo anterior en el análisis de las estructuras cristalinas, y que tienen casi todos los metales en mayor o menor grado.

El endurecimiento por deformación, o ***endurecimiento por trabajo***, como se le denomina con frecuencia, es un factor importante en ciertos procesos de manufactura, en particular en la laminacion del metal. Ahora se examinará el comportamiento de un metal en función de cómo lo afecta esta propiedad. Si la parte de la curva esfuerzo-deformación verdaderos que representa la región plástica se graficara en una escala log-log, el resultado sería una relación lineal, como se aprecia en la figura 3.5. Debido a que con esta transformación de los datos se genera una línea recta, la relación entre el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera en la región plástica se expresa como

$$\sigma = K\epsilon^n \tag{3.10}$$

Esta ecuación se llama ***curva de flujo***, y proporciona una aproximación buena del comportamiento de los metales en la región plástica, inclusive de su capacidad de endurecerse por deformación. La constante K se llama ***coeficiente de resistencia***, MPa (lb/in^2), y es igual al valor del esfuerzo verdadero para un valor igual a 1 de la deformación verdadera. El parámetro n se denomina ***exponente de endurecimiento por deformación***, y es la pendiente de la recta que se observa en la figura 3.5. Su valor está

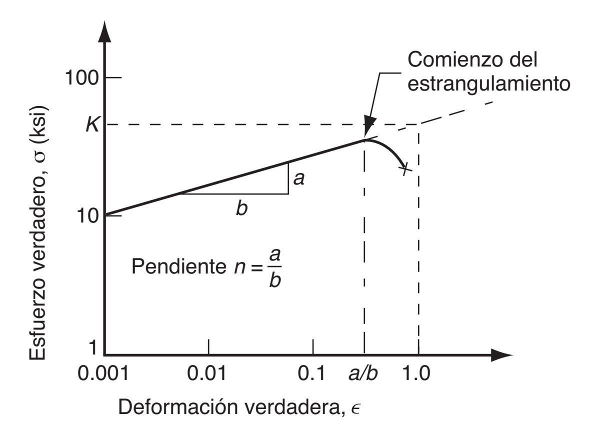


FIGURA 3.5 Curva esfuerzo-deformación verdaderos en escala log-log.

directamente relacionado con la tendencia de un metal para endurecerse con el trabajo. En la tabla 3.4 se dan valores comunes de K y n para metales seleccionados.

El estrangulamiento en una prueba de tensión y en operaciones de laminado de metales que estiran la pieza de trabajo se relaciona estrechamente con el endurecimiento por deformación. Ahora se estudiará esta relación según se observa durante una prueba de tensión. Conforme el espécimen de prueba se estira durante la parte inicial de la prueba (antes de que comience el estrangulamiento), ocurre una deformación uniforme en toda la longitud porque si cualquier elemento de la muestra se deformara más que el metal circundante, su resistencia aumentaría debido al endurecimiento por trabajo, lo que lo haría más resistente ante una deformación adicional y hasta que el metal vecino se hubiera deformado una cantidad igual. Por último, la deformación se hace tan grande que no puede sostenerse en forma uniforme. Se desarrolla un punto débil de la longitud (debido a la formación de dislocaciones en las fronteras de los granos, impurezas del metal, u otros factores), y comienza el estrangulamiento, lo que conduce a la falla. Las evidencias empíricas revelan que el estrangulamiento comienza para un metal en particular cuando la deformación verdadera alcanza un valor igual al exponente de endurecimiento por deformación, n. Por tanto, un valor elevado de n significa que el metal puede deformarse todavía más antes del comienzo del estrangulamiento durante la carga de tensión.

Tipos de relaciones esfuerzo-deformación La curva de esfuerzo-deformación verdaderos proporciona mucha información sobre el comportamiento elástico-plástico. Como se dijo, la ley de Hooke ($\sigma = Ee$) gobierna el comportamiento del metal en la región elástica, y la curva de flujo ($\sigma = K\epsilon^n$) lo determina en la región plástica. Son tres las formas

TABLA 3.4 Valores característicos del coeficiente de resistencia K y del exponente de endurecimiento por deformación, n, para metales seleccionados.

Material	Coeficiente de resistencia, K		Exponente de endurecimiento por deformación, n
	MPa	lb/in²	
Aluminio puro cocido	175	25 000	0.20
Aleación de aluminio, templada[a]	240	35 000	0.15
Aleación de aluminio, tratada térmicamente	400	60 000	0.10
Cobre, puro, templado	300	45 000	0.50
Cobre, aleación: latón[a]	700	100 000	0.35
Acero, bajo C, templado[a]	500	75 000	0.25
Acero, alto C, templado[a]	850	125 000	0.15
Acero, aleación, templado[a]	700	100 000	0.15
Acero, inoxidable, austenítico, templado	1 200	175 000	0.40

Compilado a partir de las referencias [9], [10], [11] y de otras fuentes.

[a] Los valores de K y n varían de acuerdo con la composición, el tratamiento térmico y el endurecimiento por trabajo.

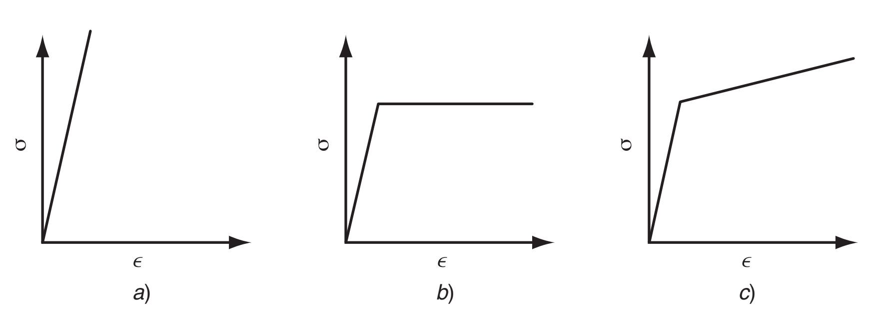


FIGURA 3.6 Tres categorías para la relación esfuerzo-deformación: *a*) perfectamente elástica; *b*) perfectamente plástica y *c*) elástico y endurecido por deformación.

básicas de relación esfuerzo-deformación que describen el comportamiento de casi todos los materiales sólidos, las que se muestran en la figura 3.6:

a) ***Perfectamente elástico***. El comportamiento de este material queda definido por completo por su rigidez, indicada por el módulo de elasticidad E. En lugar de producir un flujo plástico, se fractura. Los materiales frágiles tales como las cerámicas, muchos tipos de hierro colado y polímeros termoestables, poseen curvas de esfuerzo-deformación que pertenecen a esta categoría. Estos materiales no son buenos candidatos para las operaciones de laminado.

b) ***Elástico y perfectamente plástico.*** Este material tiene una rigidez definida por E. Una vez que se alcanza la resistencia de deformación, Y, el material se deforma plásticamente con el mismo nivel de esfuerzo. La curva de flujo está dada por $K = Y$, y $n = 0$. Los metales se comportan de esta manera cuando se calientan a temperaturas suficientemente altas que los recristalizan en lugar de endurecerlos por deformación durante su trabajo. El plomo presenta este comportamiento a temperatura ambiente porque ésta es superior al punto de recristalización del plomo.

c) ***Elástico y endurecimiento por deformación***. Este material obedece a la ley de Hooke en la región elástica. Comienza a fluir a su resistencia de deformacion Y. Una deformación continua requiere un esfuerzo siempre incremental, dada por una curva de flujo cuyo coeficiente de resistencia K es mayor que Y y cuyo exponente de endurecimiento por deformación, n, es mayor que cero. La curva de flujo por lo general se representa como función lineal en una gráfica hecha en papel logarítmico. La mayor parte de metales dúctiles se comportan de este modo cuando se trabajan en frío.

Los procesos de manufactura que deforman los materiales a través de la aplicación de esfuerzos de tensión que incluyen el estirado de alambres y barras (véase la sección 21.4) y el conformado por estiramiento (véase la sección 22.6.1).

3.1.2 Propiedades ante la compresión

Una prueba de compresión aplica una carga que comprime una muestra cilíndrica colocada entre dos placas, como se ilustra en la figura 3.7. Conforme se comprime, su altura se reduce y el área de su sección transversal se incrementa. El esfuerzo de ingeniería se define como

$$\sigma_e = \frac{F}{A_o} \tag{3.11}$$

donde A_o = área original del espécimen. Ésta es la misma definición del esfuerzo de ingeniería que se utilizó en la prueba de tensión. La deformación de ingeniería se define como

$$e = \frac{h - h_o}{h_o} \tag{3.12}$$

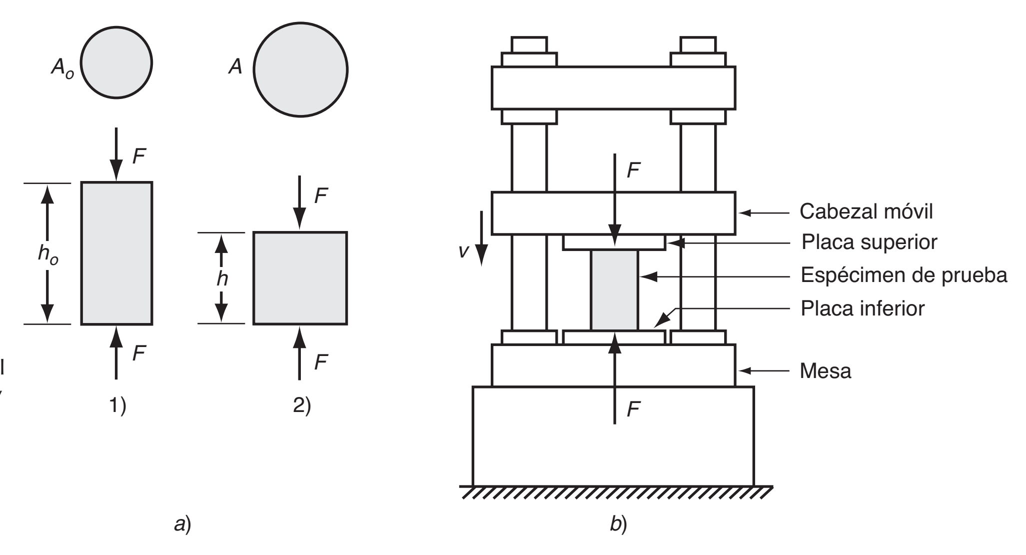


FIGURA 3.7 Prueba de compresión: *a*) fuerza de compresión que se aplica al ejemplar de prueba en 1), y 2) cambio resultante de la altura; y *b*) disposición de la prueba, exagerando el tamaño del espécimen de prueba.

donde h = altura del espécimen en un momento particular de la prueba, mm (in); y h_0 = altura inicial, mm (in). Debido a que durante la compresión la altura disminuye, el valor de e será negativo. El signo negativo por lo general se ignora cuando se expresan los valores de la deformación por compresión.

Si en una prueba de compresión se grafica el esfuerzo de ingeniería contra la deformación de ingeniería, el resultado se asemeja a la figura 3.8. Como antes, la curva se divide en las regiones elástica y plástica, pero la forma de la parte plástica es diferente de aquella correspondiente a la prueba de tensión. Debido a que la compresión ocasiona que la sección transversal se incremente (en vez de disminuir, como en la prueba de tensión), la carga se incrementa con mayor rapidez que antes. Esto da como resultado un valor más alto del esfuerzo de ingeniería calculado.

En la prueba de compresión ocurre algo más que contribuye al aumento del esfuerzo. Conforme el espécimen cilíndrico se comprime, la fricción en sus superficies que están en

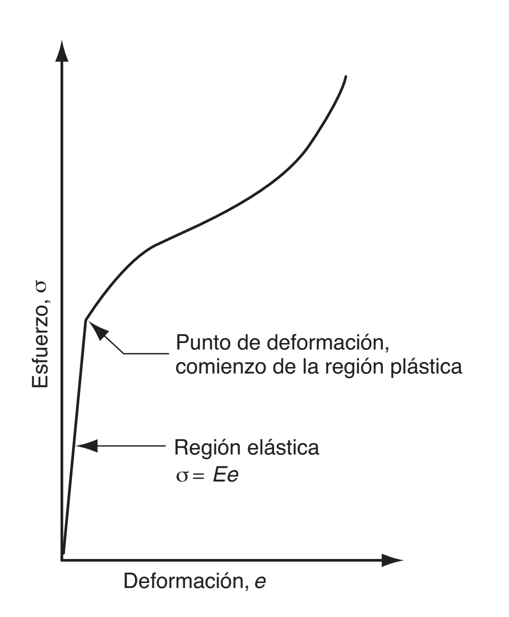


FIGURA 3.8 Curva esfuerzo-deformación común de ingeniería, para una prueba de compresión.

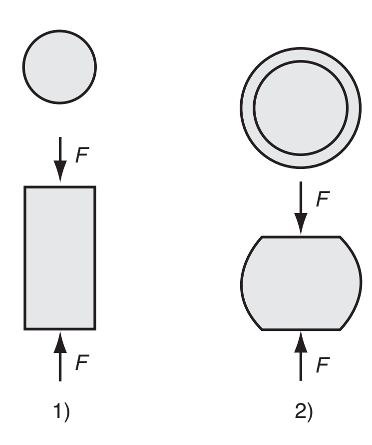


FIGURA 3.9 Efecto de barril en una prueba de compresión: 1) comienzo de la prueba; y 2) después de que ha tenido lugar una compresión considerable.

contacto con las placas tiende a impedir que los extremos del cilindro se expandan. Durante la prueba se consume energía adicional debido a esta fricción, lo que da como resultado una fuerza aplicada más grande. También se muestra un incremento en el esfuerzo de ingeniería calculado. Así, debido al aumento del área de la sección transversal y a la fricción entre el espécimen y las placas, se obtiene la curva esfuerzo-deformación de ingeniería característica de una prueba de este tipo según se aprecia en la figura.

Otra consecuencia de la fricción entre las superficies es que el material cercano de la parte media del espécimen sí puede incrementar su área mucho más que los extremos. Esto resulta en que la muestra adopte una forma característica de ***barril***, como se ilustra en la figura 3.9.

Aunque hay diferencias entre las curvas de esfuerzo-deformación de ingeniería correspondientes a la tensión y a la compresión, cuando se grafican los datos respectivos como esfuerzo-deformación verdaderos, las relaciones son casi idénticas (para casi todos los materiales). Debido a que en la bibliografía abundan más los resultados de la prueba de tensión, es posible obtener valores de los parámetros de la curva de flujo (K y n) a partir de datos de esas pruebas y aplicarlos con igual validez a una operación de compresión. Lo que debe hacerse al usar los resultados de la prueba de tensión para una operación de compresión es ignorar el efecto de la estrangulación, fenómeno que es peculiar para la deformación inducida por esfuerzos de tensión. En la compresión no hay un colapso correspondiente del trabajo. (Podría argumentarse que el abombamiento de secciones largas y delgadas durante la compresión es la contraparte del estrangulamiento. Sin embargo, ese abombamiento es un modo de falla que involucra la flexión del espécimen, por lo que el esfuerzo ya no se limita sólo a la compresión. En la sección siguiente se estudian los esfuerzos del doblado.) En las gráficas anteriores de curvas de tensión de esfuerzo-deformación se extendieron los datos más allá del punto de estrangulamiento por medio de líneas punteadas. Éstas representan mejor el comportamiento del material durante la compresión que los datos de prueba reales de la tensión.

Las operaciones de compresión en la forja de metal son mucho más comunes que las de estiramiento. Los procesos importantes de compresión en la industria incluyen el laminado, forjado y extrusión (véase el capítulo 19).

3.1.3 Doblado y prueba de materiales frágiles

Las operaciones de doblado se emplean para formar placas y hojas metálicas. Como se ve en la figura 3.10, el proceso de doblar una sección transversal rectangular, sujeta al material a esfuerzos de tensión (y deformación) en la mitad externa de la sección que se dobla, y a esfuerzos de compresión (y deformaciones) en la mitad interior. Si el material no se fractura, queda doblado en forma permanente (plásticamente), como se muestra en el inciso 3) de la figura 3.10.

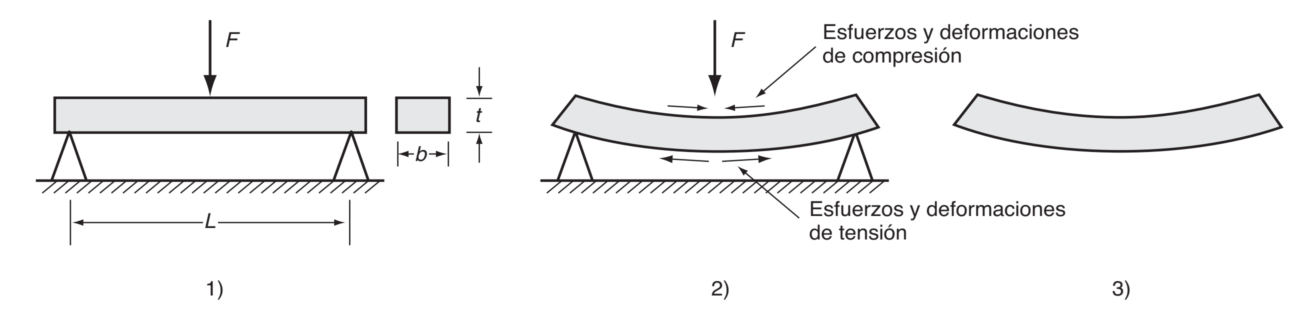


FIGURA 3.10 El doblado de una sección transversal rectangular produce en el material esfuerzos tanto de tensión como de compresión: 1) carga inicial; 2) espécimen con mucho esfuerzo y deformación; y 3) pieza doblada.

Los materiales duros y frágiles (por ejemplo, cerámicas), que tienen elasticidad pero poca o ninguna plasticidad, con frecuencia se prueban con un método que sujeta a la muestra a una carga flexionante. Estos materiales no responden bien a las pruebas de tensión tradicionales debido a los problemas para preparar los especímenes de prueba y la posibilidad de alinear mal las partes de la prensa que los sujeta. La ***prueba de doblado*** (también conocida como ***prueba de flexión***) se utiliza para probar la resistencia de estos materiales, con el uso del arreglo que se ilustra en el primer diagrama de la figura 3.10. En ese procedimiento, se coloca un espécimen de sección transversal rectangular entre dos apoyos, y en su centro se aplica una carga. En esta configuración, la prueba se denomina de doblado de tres puntos. En ocasiones también se utiliza una configuración de cuatro puntos. Los materiales frágiles no se flexionan en el grado exagerado que se muestra en la figura 3.10; en vez de ello, se deforman elásticamente hasta el momento inmediato anterior a la fractura. La falla ocurre por lo general porque se excede la resistencia final de tensión de las fibras exteriores del espécimen. Esto da como resultado un ***agrietamiento*** o ***clivaje***, modo de falla que se asocia con las cerámicas y metales que operan a temperaturas de uso bajas, en el que en vez de separación ocurre deslizamiento a lo largo de los planos cristalográficos. El valor de resistencia obtenido de esta prueba se denomina ***resistencia a la ruptura transversal***, y se calcula con la fórmula siguiente

$$TRS = \frac{1.5\,FL}{bt^2} \tag{3.13}$$

donde TRS = resistencia a la ruptura transversal, MPa (lb/in^2); F = carga aplicada al ocurrir la fractura, N (lb); L = longitud entre los apoyos del espécimen, mm (in); y b y t son las dimensiones de la sección transversal del espécimen, como se muestra en la figura, mm (in).

La prueba de flexión también se utiliza para ciertos materiales que no son frágiles, tales como los polímeros termoplásticos. En este caso, como es probable que el material se deforme en vez de fracturarse, no puede determinarse la TRS con base en la falla del espécimen. En vez de ello, se emplea cualquiera de dos medidas: 1) la carga registrada para un nivel dado de deflexión, o 2) la deflexión observada para una carga dada.

3.1.4 Propiedades ante la cortante

Una cortante comprende la aplicación de esfuerzos en direcciones opuestas sobre ambos lados de un elemento delgado a fin de deformarlo como se muestra en la figura 3.11. El esfuerzo cortante se identifica como

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{3.14}$$

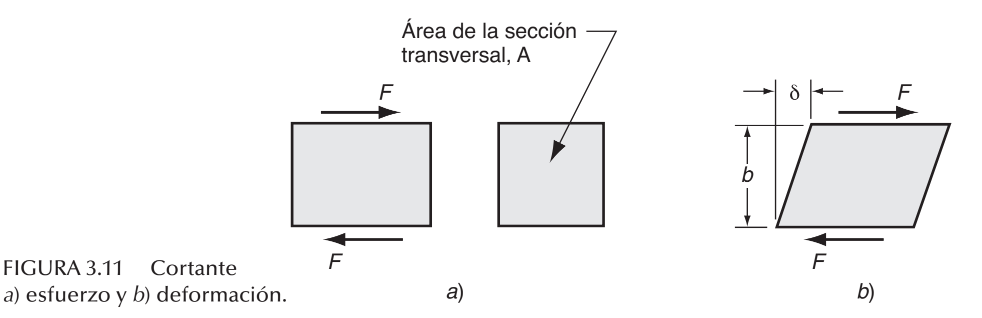


FIGURA 3.11 Cortante *a*) esfuerzo y *b*) deformación.

donde τ = esfuerzo cortante, lb/in^2 (MPa); F = fuerza aplicada, N (lb); y A = área sobre la que se aplica la fuerza, in^2 (mm^2). La deformación cortante se define como

$$\gamma = \frac{\delta}{b} \tag{3.15}$$

donde γ = deformación cortante, mm/mm (in/in); δ = deflexión del elemento, mm (in); y b = distancia ortogonal sobre la que ocurre la deflexión, mm (in).

Es común probar el esfuerzo y deformación cortantes por medio de una ***prueba de torsión***, en la que un espécimen tubular de pared delgada se sujeta a un par, como se ilustra en la figura 3.12. Conforme el par aumenta, el tubo se flexiona por torsión, que para esta geometría es una deformación cortante.

En la prueba, el esfuerzo cortante se determina con la ecuación

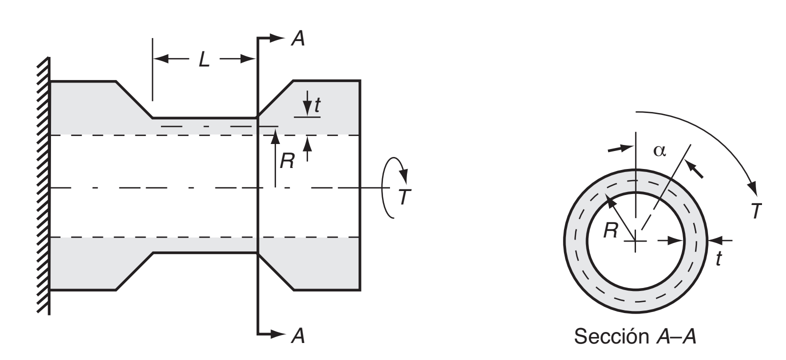
$$\tau = \frac{T}{2\pi R^2 t} \tag{3.16}$$

donde T = par aplicado, N-mm (lb-in); R = radio del tubo medido respecto del eje neutro de la pared, mm (in); y t = espesor de la pared, mm (in). La deformación cortante se determina con la medición de la cantidad de deflexión angular del tubo, la que se convierte a distancia flexionada y se divide entre la longitud de medición, L. Al reducir esto a una expresión sencilla queda

$$\gamma = \frac{R\alpha}{L} \tag{3.17}$$

donde α = la deflexión angular (radianes).

FIGURA 3.12 Arreglo de la prueba de torsión.



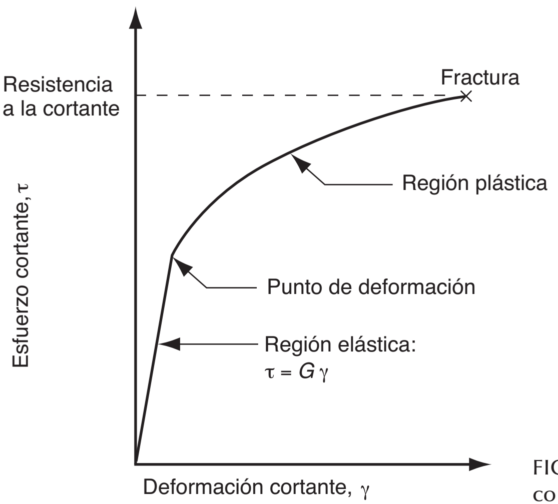


FIGURA 3.13 Curva común esfuerzo-deformación cortante a partir de una prueba de torsión.

En la figura 3.13 se presenta una curva común de esfuerzo-deformación cortante. En la región elástica, la relación está definida por

$$\tau = G\gamma \tag{3.18}$$

donde G = ***módulo de la cortante***, o ***módulo de la cortante de elasticidad***, MPa (lb/in^2). Para la mayoría de los materiales, el módulo de la cortante es aproximadamente de $G = 0.4E$, donde E es el módulo de elasticidad convencional.

En la región plástica de la curva esfuerzo-deformación cortante, el material sujeto a deformación se endurece y ocasiona que el par aplicado aumente hasta que, finalmente, ocurre la fractura. En esta región, la relación es similar a la curva de flujo. Es posible calcular el esfuerzo cortante en la fractura, que se usa como la ***resistencia a la cortante***, S, del material. La resistencia a la cortante se puede estimar a partir de los datos de resistencia a la tensión, por medio de la aproximación: $S = 0.7(TS)$.

Como el área de la sección transversal del espécimen en la prueba de torsión no cambia, como sí lo hace en las pruebas de tensión y compresión, la curva de esfuerzo-deformación de ingeniería para la cortante obtenida a partir de la prueba de torsión es virtualmente la misma que la curva esfuerzo-deformación verdadera.

En la industria son comunes los procesos cortantes. La acción cortante se utiliza para cortar láminas metálicas en operaciones de cizallado, punzonado y otras (véase la sección 20.1). Al maquinar, el material se retira por medio del mecanismo de deformación cortante (véase la sección 21.2).

3.2 DUREZA

La ***dureza*** de un material se define como su resistencia a la indentación permanente. Por lo general, una dureza buena significa que el material es resistente a las rayaduras y al uso. Ésta es una característica importante para muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo la mayoría del herramental usado en la manufactura. Como se verá más adelante en esta sección, hay una estrecha correlación entre la dureza y la resistencia.

3.2.1 Pruebas de dureza

Es común utilizar pruebas de dureza para evaluar las propiedades del material porque son rápidas y convenientes. Sin embargo, son varios los métodos de prueba apropiados debido a las diferencias de dureza de materiales distintos. Las pruebas de dureza más conocidas son las de Brinell y Rockwell.

Prueba de dureza de Brinell La prueba de dureza de Brinell se usa mucho para medir la dureza de metales y no metales de dureza baja a media. Recibe su nombre en honor del ingeniero sueco que la creó alrededor de 1900. En la prueba, se presiona una esfera de acero endurecido (o carburo cementado) de 10 mm de diámetro, contra la superficie de un espécimen, con una carga de 500, 1500 o 3000 kg. Después, se divide la carga entre el área de indentación para obtener el Número de Dureza de Brinell (BHN). En forma de ecuación se tiene

$$HB = \frac{2F}{\pi D_b (D_b - \sqrt{D_b^2 - D_i^2})} \tag{3.19}$$

donde HB = Número de Dureza de Brinell (BHN); F = carga de indentación, kg; D_b = diámetro de la esfera, mm; y D_i = diámetro de la indentación sobre la superficie, mm. Estas dimensiones se indican en la figura 3.14*a*). El BHN resultante tiene unidades de kg/mm^2, pero por lo general las unidades se omiten cuando se expresa el número. Para materiales más duros (por arriba de 500 BHN), se emplea la esfera de carburo cementado porque la de acero experimenta deformación elástica que falsea la exactitud de la lectura. Asimismo, para materiales más duros es común utilizar cargas mayores (1 500 y 3 000 kg). Debido a las diferencias en los resultados según las distintas cargas, al hacer reportes de las lecturas HB se considera una práctica buena indicar cuál fue la que se usó en la prueba.

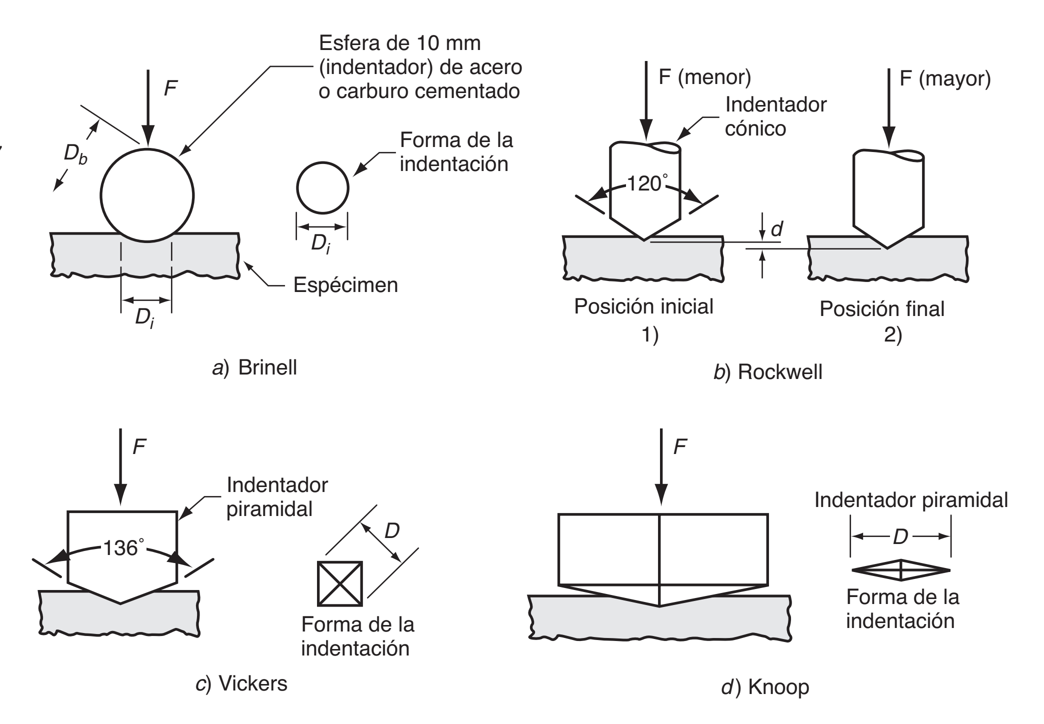


FIGURA 3.14 Métodos de prueba de la dureza: *a*) Brinell, *b*) Rockwell: 1) carga inicial menor y 2) carga grande, *c*) Vickers, y *d*) Knoop.

TABLA 3.5 Escalas de dureza de Rockwell comunes.

Escala de Rockwell	Símbolo de la dureza	Indentador	Carga (kg)	Materiales comunes probados
A	HRA	Cono	60	Carburos, cerámicas
B	HRB	Esfera de 1.6 mm	100	Metales no ferrosos
C	HRC	Cono	150	Metales ferrosos, acero para herramienta

Prueba de dureza de Rockwell Ésta es otra prueba que se usa mucho; recibe su nombre en honor del metalurgista que la creó a principios de la década de 1920. Es conveniente de usar, y varias mejoras que se le hicieron a lo largo de los años la adaptaron a una variedad de materiales.

En la Prueba de Dureza de Rockwell, se presiona un indentador cónico, o esfera de diámetro pequeño, de 1.6 mm o 3.2 mm (1/16 o 1/8 in) contra un espécimen, por medio de una carga pequeña de 10 kg, lo que asienta el indentador en el material. Después se aplica una carga mayor de 150 kg (u otro valor), lo que hace que el indentador penetre en el espécimen cierta profundidad más allá de su posición inicial. La máquina de prueba convierte esta distancia de penetración, *d*, en una lectura de dureza de Rockwell. En la figura 3.14*b*) se ilustra la secuencia. Las diferencias en la carga y geometría del indentador proporcionan varias escalas de Rockwell para distintos materiales. En la tabla 3.5 se indican las escalas más comunes.

Prueba de dureza de Vickers Esta prueba, también creada a principios de la década de 1920, utiliza un indentador de forma piramidal hecho de diamante. Se basa en el principio de que las impresiones dejadas por él son similares en cuanto a su geometría sin importar la carga que se emplee. De acuerdo con esto, se aplican varias cargas en función de la dureza del material por medir. Después se determina la Dureza de Vickers (HV) por medio de la fórmula

$$HV = \frac{1.854\, F}{D^2} \tag{3.20}$$

donde F = carga aplicada, kg, y D = diagonal de la impresión hecha por el indentador, mm, como se indica en la figura 3.14*c*). La prueba de Vickers se utiliza para todos los metales y tiene una de las escalas más amplias entre las pruebas de dureza.

Prueba de dureza de Knoop La prueba de Knoop, creada en 1939, usa un indentador de diamante de forma piramidal, pero la pirámide tiene una razón longitud-ancho alrededor de 7:1, como se aprecia en la figura 3.14*d*), y las cargas que se aplican por lo general son más ligeras que las de la prueba de Vickers. Es una prueba de microdureza, lo que significa que es apropiada para medir especímenes pequeños y delgados de materiales duros que podrían fracturarse si se aplicara una carga pesada. La forma del indentador facilita la lectura de la impresión con las cargas más ligeras que se emplean en esta prueba. El valor de la dureza de Knoop (HK) se determina con la fórmula

$$HK = 14.2 \frac{F}{D^2} \tag{3.21}$$

donde F = carga, kg; y D = diagonal larga del indentador, mm. Debido a que la impresión que se obtiene con esta prueba por lo general es muy pequeña, debe tenerse cuidado al preparar la superficie por medir.

Escleroscopio Las pruebas anteriores basan las mediciones de la dureza en la razón de la carga aplicada dividida entre el área de la impresión resultante (Brinell, Vickers y Knoop) o bien entre la profundidad de ésta (Rockwell). El escleroscopio es un instrumento que

TABLA 3.6 Dureza normal de metales seleccionados.

Metal	Dureza de Brinell, HB	Dureza de Rockwell, HR[a]	Metal	Dureza de Brinell, HB	Dureza de Rockwell, HR[a]
Aluminio recocido	20		Aleaciones de magnesio, endurecidas[b]	70	35B
Aluminio, trabajado en frío	35		Níquel, templado	75	40B
Aleaciones de aluminio, templadas[b]	40		Acero, bajo C, laminado en caliente[b]	100	60B
Aleaciones de aluminio, endurecidas[b]	90	52B	Acero, alto C, prensado en caliente[b]	200	95B, 15C
Aleaciones de aluminio, coladas[b]	80	44B	Acero, aleación, templado[b]	175	90B, 10C
Hierro colado, gris, como fundición[b]	175	10C	Acero, aleación, tratado con calor[b]	300	33C
Cobre, templado	45		Acero, inoxidable, austenítico[b]	150	85B
Aleación de cobre: latón, templado	100	60B	Titanio, casi puro	200	95B
Plomo	4		Zinc	30	

Compilado de las referencias [10], [11], [15], y otras fuentes.

[a] Los valores HR están dados en la escala B o C, como lo indica la letra que los designa. Donde no hay valores significa que la dureza es demasiado baja para las escalas de Rockwell.

[b] Los valores HB dados son comunes. Los valores de dureza variarán de acuerdo con la composición, el tratamiento térmico y grado de endurecimiento por trabajo.

mide la altura del rebote de un "martillo" que se deja caer desde cierta altura sobre la superficie del material que se prueba. El martillo consiste en un peso con un indentador de diamante sujeto a él. Entonces, el escleroscopio mide la energía mecánica absorbida por el material cuando el indentador golpea la superficie. Esta energía absorbida indica la resistencia a la penetración, lo que está de acuerdo con nuestra definición de dureza. Entre más energía se absorba, menor será el rebote, lo que indica un material más suave. Entre menos energía se absorba, el rebote será mayor, el material sería más duro. El uso principal del escleroscopio se da en la medición de la dureza de elementos grandes de acero y otros metales ferrosos.

Durómetro Las pruebas anteriores se basan en la resistencia a la deformación permanente o plástica (indentación). El durómetro es un dispositivo que mide la deformación elástica del caucho y materiales flexibles parecidos, mediante la presión de un indentador sobre la superficie del objeto. La resistencia a la penetración es una indicación de la dureza, según se aplica el término a este tipo de materiales.

3.2.2 Dureza de distintos materiales

En esta sección se comparan los valores de la dureza de algunos materiales comunes de las tres clases que se emplean en la ingeniería: metales, cerámicas y polímeros.

TABLA 3.7 Dureza de cerámicas seleccionadas y otros materiales duros, listados en orden ascendente de dureza.

Material	Dureza de Vickers, HV	Dureza de Knoop, HK	Material	Dureza de Vickers, HV	Dureza de Knoop, HK
Acero[a] endurecido para herramientas	800	850	Nitruro de titanio, TiN	3000	2300
Carburo cementado (WC-Co)[a]	2000	1400	Carburo de titanio, TiC	3200	2500
Alúminia, Al_2O_3	2200	1500	Nitruro cúbico de boro, BN	6000	4000
Carburo de tungsteno, WC	2600	1900	Diamante, policristal sintetizado	7000	5000
Carburo de silicio, SiC	2600	1900	Diamante, natural	10000	8000

Compilado de las referencias [13], [15] y otras fuentes.

[a] El acero endurecido para herramientas y el carburo cementado son los dos materiales que comúnmente se usan en la prueba de dureza de Brinell.

TABLA 3.8 Dureza de polímeros seleccionados.

Polímero	Dureza de Brinell, HB	Polímero	Dureza de Brinell, HB
Nailon	12	Polipropileno	7
Fenol formaldehído	50	Poliestireno	20
Polietileno, de baja densidad	2	Cloruro de polivinilo	10
Polietileno, de alta densidad	4		

Compilado de las referencias [4], [8] y otras fuentes.

Metales Las pruebas de dureza de Brinell y Rockwell se crearon en una época en que los metales eran los materiales principales de la ingeniería. Se ha recabado una cantidad significativa de datos con el empleo de dichas pruebas en los metales. La tabla 13.6 enlista los valores de la dureza de metales seleccionados.

Para la mayoría de metales, la dureza se relaciona de cerca con la resistencia. Debido a que el método de prueba de la dureza por lo general se basa en la resistencia a la indentación, que a su vez es una forma de la compresión, sería de esperar una correlación buena entre las propiedades de dureza y resistencia determinadas con una prueba de compresión. Pero las propiedades de resistencia en una prueba de compresión son casi las mismas que las de una prueba de tensión, con tolerancia para cambios del área de la sección transversal de los especímenes de prueba respectivos; entonces, la correlación con propiedades a la tensión también debe ser buena.

La prueba de dureza de Brinell (HB) presenta una correlación estrecha con la resistencia definitiva a la tensión TS de los aceros, lo cual conduce a la relación [9], [14]:

$$TS = K_h(HB) \tag{3.22}$$

donde K_h es una constante de proporcionalidad. Si TS se expresa en MPa, entonces K_h = 3.45; y si TS está en lb/in^2, entonces K_h = 500.

Cerámicas La prueba de dureza de Brinell no es apropiada para las cerámicas debido a que los materiales de prueba con frecuencia son más duros que la bola indentadora. Para probarlos se utilizan las pruebas de Vickers y Knoop. En la tabla 3.7 se enlistan los valores de dureza de varias cerámicas y materiales duros. Para efectos de comparación, la dureza C de Rockwell del acero endurecido para herramientas es 65 HRC. La escala HRC no se extiende lo suficiente hacia arriba como para usarla para los materiales más duros.

Polímeros De los tres tipos de materiales de ingeniería, los polímeros son los que tienen la dureza más baja. En la tabla 3.8 se enlistan varios de los polímeros en la escala de dureza de Brinell, aunque este método de prueba normalmente no se usa para estos materiales. Sin embargo, permite la comparación con la dureza de los metales.

3.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES

La temperatura tiene un efecto significativo sobre casi todas las propiedades de un material. Para el diseñador es importante conocer las propiedades del material a las temperaturas de operación del producto cuando está en uso. También es importante saber cómo afecta la temperatura las propiedades mecánicas en la manufactura. A temperaturas elevadas, los materiales resisten menos y aumenta su ductilidad. En la figura 3.15 se presentan las relaciones generales de los metales. Así, la mayoría de los

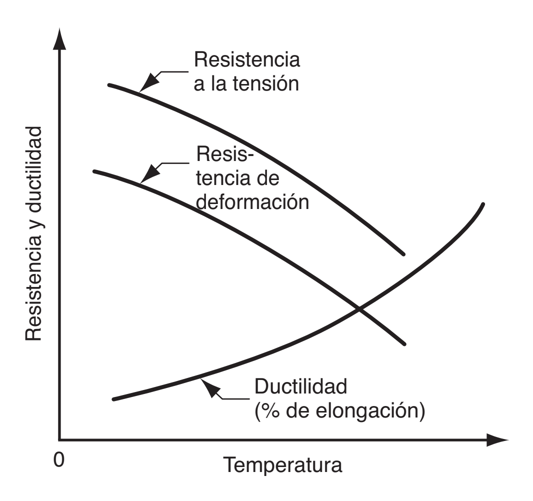


FIGURA 3.15 Efecto general de la temperatura sobre la resistencia y ductilidad.

metales puede trabajarse con más facilidad a temperaturas elevadas que cuando están fríos.

Dureza en caliente Una propiedad que es frecuente utilizar para caracterizar la resistencia y la dureza a temperaturas elevadas es la dureza de calentamiento. La ***dureza en caliente*** es tan sólo la capacidad que tiene un material para mantener su dureza a temperaturas elevadas; por lo general se presenta ya sea como una lista de valores de dureza a temperaturas distintas, o como una gráfica de la dureza *versus* la temperatura, como se ilustra en la figura 3.16. Pueden hacerse aleaciones de acero para lograr mejoras significativas de la dureza en caliente, como se aprecia en la figura 3.16. Las cerámicas muestran propiedades superiores a temperaturas elevadas. Es frecuente que estos materiales se seleccionen para aplicaciones a temperaturas altas, como las piezas de una turbina, herramientas de corte y usos refractarios. La superficie exterior de los transbordadores espaciales está recubierta con bloques de cerámica para que soporte mejor el calor por la fricción de la reentrada a la atmósfera a altas velocidades.

También es deseable que haya buena dureza en caliente en los materiales para las herramientas que se usan en muchas operaciones de manufactura. En la mayor parte de procesos para trabajar metal se generan cantidades significativas de calor, y las herramientas deben ser capaces de soportar las temperaturas elevadas involucradas.

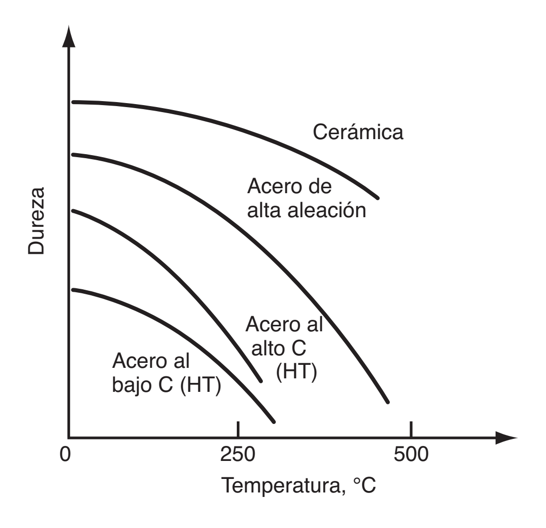


FIGURA 3.16 Dureza en caliente: dureza común como una función de la temperatura para varios materiales.

Temperatura de recristalización A temperatura ambiente, la mayor parte de los metales se comporta de acuerdo con la curva de flujo en la región plástica. Conforme el metal se deforma, incrementa su resistencia debido al endurecimiento por deformación (el exponente deformación-endurecimiento $n > 0$). Pero si el metal se calienta a temperatura suficientemente elevada y se deforma, el endurecimiento por deformación no tiene lugar. En vez de ello, se forman granos nuevos libres de deformación, y el metal se comporta como un material perfectamente plástico, es decir, con un exponente deformación-endurecimiento $n = 0$. La formación de granos nuevos libres de deformación es un proceso denominado ***recristalización***, y la temperatura a la que sucede es de alrededor de la mitad del punto de fusión ($0.5\ T_m$), medida en escala absoluta (grados R o K), y recibe el nombre de ***temperatura de recristalización***. La recristalización requiere de tiempo. Por lo general, para un metal en particular se especifica como la temperatura a la que se completa la formación de granos nuevos y requiere normalmente de una hora, aproximadamente.

La recristalización es una característica de los metales que depende de la temperatura y puede aprovecharse en la manufactura. Al calentar el metal a la temperatura de recristalización antes de la deformación, la cantidad de deformación que el metal puede soportar es sustancialmente mayor, y las fuerzas y la potencia requeridas para llevar a cabo el proceso se reducen mucho. La forja de metales a temperaturas por arriba de la de recristalización se denomina ***trabajo en caliente*** (véase la sección 18.3).

3.4 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos se comportan de manera muy diferente de los sólidos. Un fluido fluye; es decir, adopta la forma del envase que lo contiene. Un sólido no fluye; tiene una forma geométrica que es independiente del medio. Los fluidos incluyen a los líquidos y gases: en esta sección, el interés es para los primeros. Muchos procesos de manufactura se ejecutan en materiales que han pasado del estado sólido al líquido a través de calentamiento. Los metales son líquidos en el estado de fusión; el vidrio se forma en un estado caliente y muy fluido; y a los polímeros casi siempre se les moldea como fluidos espesos.

Viscosidad Aunque el flujo es una característica que define a los fluidos, la tendencia a fluir varía de uno a otro. La viscosidad es la propiedad que determina que un fluido fluya. A grandes rasgos, la ***viscosidad*** se define como la resistencia al flujo que es característica de un fluido. Es una medida de la fricción interna que aparece cuando hay presentes gradientes de velocidad en el fluido, entre más viscoso es el fluido, mayor es la fricción interna y mayor la resistencia al flujo. El inverso de la viscosidad es la ***fluidez***, es decir, la facilidad con que el fluido fluye.

Con más precisión, la viscosidad se define respecto de un arreglo como el que se ilustra en la figura 3.17, en el que dos placas paralelas están separados por una distancia d. Una de ellas es estacionaria, mientras que la otra se mueve a velocidad v, y el espacio entre

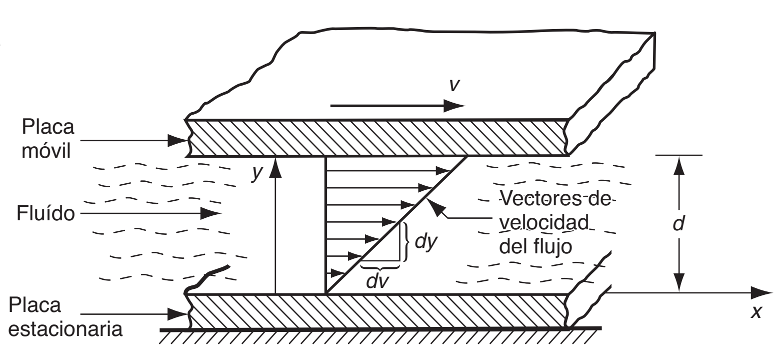


FIGURA 3.17 El fluido fluye entre dos placas paralelas, una permanece estacionaria y la otra se mueve a una velocidad v.

ellas está ocupado por un fluido. Al orientar estos parámetros en relación con un sistema de ejes coordenados, d está en la dirección del eje y y v en dirección del eje x. Al movimiento de la placa superior se opone la fuerza F que resulta de la acción de viscosidad cortante del fluido. Esta fuerza se reduce a un esfuerzo cortante si se divide F entre la superficie de la placa, A:

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{3.23}$$

donde τ = esfuerzo cortante, N/m^2 o Pa (lb/in^2). Este esfuerzo cortante se relaciona con la tasa de cortante, que se define como el cambio de la velocidad dv respecto de dy. Es decir,

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \tag{3.24}$$

donde $\dot{\gamma}$ = tasa de cortante, 1/s; dv = cambio incremental de la velocidad, m/s (in/s); y dy = cambio incremental de la distancia y, m (in). La viscosidad cortante es la propiedad del fluido que define la relación entre F/A y dv/dy; es decir,

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dy} \quad \text{o} \quad \tau = \eta r \tag{3.25}$$

donde η = una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de viscosidad, Pa-s (lb-s/in^2). Si se reacomoda la ecuación (3.25), el coeficiente de viscosidad puede expresarse como sigue:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{3.26}$$

Así, la viscosidad de un fluido se define como la razón del esfuerzo cortante a la tasa del cortante durante el flujo, donde el esfuerzo cortante es la fuerza por fricción que el fluido ejerce por unidad de área, y la tasa del cortante es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección de flujo. Newton fue quien enunció primero las características de viscosidad de los fluidos definidas por la ecuación (3.26). Él observó que la viscosidad era una propiedad constante de un fluido dado, y un fluido de ese tipo se denomina ***fluido newtoniano***.

Las unidades del coeficiente de viscosidad requieren explicación. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), debido a que el esfuerzo cortante se expresa en N/m^2 o Pascales, y la tasa del cortante en 1/s, sigue que η tiene unidades de N-s/m^2 o Pascal-segundo, que se abrevia Pa-s. En el sistema de unidades tradicional de Estados Unidos, las unidades correspondientes son lb/in^2 y 1/s, de modo que las unidades del coeficiente de viscosidad están en lb-s/in^2. Otra unidad que a veces se emplea para la viscosidad es el poise, que es = dina-s/cm^2 (10 poises = 1 Pas y 6 895 Pas = 1 lb-s/in^2). En la tabla 3.9 se dan algunos valores comunes del coeficiente de viscosidad para distintos fluidos. Se observa que la viscosidad de varios materiales de los que se mencionan varía con la temperatura.

La viscosidad en los procesos de manufactura Para muchos metales, la viscosidad en el estado fundido se compara a la del agua a la temperatura ambiente. Ciertos procesos de manufactura, en especial la fundición y soldadura autógena, se llevan a cabo sobre metales en estado fundido, y el éxito de esas operaciones requiere viscosidad baja para que el metal fundido llene la cavidad del molde o suelde la costura antes de solidificarse. En otras operaciones, como la forja y maquinado de metal, se emplean lubricantes y enfriadores durante el proceso, y, de nuevo, el éxito de esos fluidos depende hasta cierto punto de sus viscosidades.

Las cerámicas vidriadas muestran una transición gradual de los estados sólidos a los líquidos conforme la temperatura aumenta; no se funden en forma súbita, como sí lo hacen los metales. En la tabla 3.9 se ilustra ese efecto por medio de los valores de la viscosidad del vidrio a temperaturas diferentes. A temperatura ambiente, el vidrio es sólido y frágil, no presenta tendencia a fluir; para todo propósito práctico, su viscosidad es infinita. Conforme

TABLA 3.9 Valores de la viscosidad de diferentes fluidos.

Material	Coeficiente de viscosidad Pa-s	Coeficiente de viscosidad lb-sec/in^2	Material	Coeficiente de viscosidad Pa-s	Coeficiente de viscosidad lb-sec/in^2
Vidrio[b], 540 C (1 000 F)	10^{12}	10^{8}	Jarabe para hot cakes (temp. amb.)	50	73×10^{-4}
Vidrio[b], 815 C (1 500 F)	10^{5}	14	Polímero[a], 151 C (300 F)	115	167×10^{-4}
Vidrio[b], 1 095 C (2 000 F)	10^{3}	0.14	Polímero[a], 205 C (400 F)	55	80×10^{-4}
Vidrio[b], 1 370 C (2 500 F)	15	22×10^{-4}	Polímero[a], 260 C (500 F)	28	41×10^{-4}
Mercurio, 20 C (70 F)	0.0016	0.23×10^{-6}	Agua, 20 C (70 F)	0.001	0.15×10^{-6}
Aceite para máquinas (temp. amb.)	0.1	0.14×10^{-4}	Agua, 100 C (212 F)	0.0003	0.04×10^{-6}

Compilada de varias fuentes.

[a]El polietileno de baja densidad se utiliza aquí como ejemplo de polímero; la mayor parte de otros polímeros tienen viscosidades ligeramente mayores.

[b]La composición del vidrio es sobre todo SiO_2; las composiciones y viscosidades varían; los valores dados son representativos.

se calienta, el vidrio se suaviza en forma gradual, y se hace cada vez menos viscoso (más y más fluido), hasta que al final puede dársele forma por medio del soplado o moldeo, a alrededor de 1 100 ºC (2 000 ºF).

La mayoría de procesos para dar forma a los polímeros se realizan a temperaturas elevadas, cuando el material está en una condición líquida o muy plástica. Los polímeros termoplásticos representan el caso más claro, y constituyen también la mayoría de polímeros comunes. A temperaturas bajas, los polímeros termoplásticos son sólidos; conforme la temperatura aumenta, lo normal es que primero se transformen en un material suave parecido al caucho, y después en un fluido espeso. Al continuar elevándose la temperatura, la viscosidad disminuye en forma gradual, como se indica en la tabla 3.9 para el polietileno, el polímero termoplástico de uso más extendido. Sin embargo, con los polímeros la relación se complica por otros factores. Por ejemplo, la viscosidad se ve afectada por el gasto. La viscosidad de un polímero termoplástico no es constante. Un polímero fundido no se comporta como un líquido newtoniano. En la figura 3.18 puede verse su relación entre el esfuerzo cortante y la tasa cortante. Un fluido que presente esta viscosidad decreciente con tasa de cortante en aumento se llama ***seudoplástico***. El comportamiento complica el análisis del moldeo del polímero.

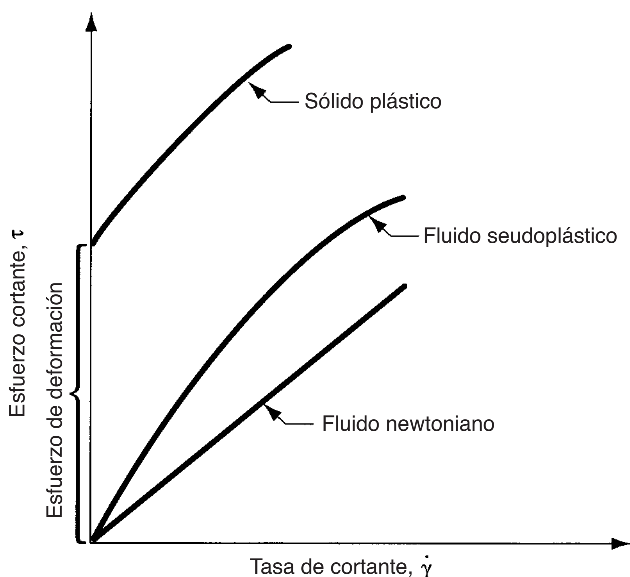


FIGURA 3.18 Comportamientos viscosos de fluidos newtonianos y seudoplásticos. Al fundirse, los polímeros presentan un comportamiento seudoplástico. A manera de comparación, se muestra el comportamiento de un material sólido plástico.

3.5 COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE LOS POLÍMEROS

Otra propiedad característica de los polímeros es la viscoelasticidad. La ***viscoelasticidad*** es aquella propiedad que tiene un material que determina la deformación que experimenta cuando se le sujeta a combinaciones de esfuerzo y temperatura a lo largo del tiempo. Como el nombre lo sugiere, es una combinación de viscosidad y elasticidad. A continuación se explicará la viscoelasticidad respecto de la figura 3.19. Los dos incisos de la figura muestran la respuesta común de dos materiales ante un esfuerzo aplicado por debajo del punto de deformación durante algún periodo de tiempo. En el inciso *a*), el material presenta elasticidad perfecta; cuando el esfuerzo desaparece el material regresa a su forma original. En contraste, en el inciso *b*), el material muestra un comportamiento viscoelástico. La cantidad de deformación se incrementa gradualmente en el tiempo con el esfuerzo aplicado. Al retirar los esfuerzos, el material no regresa de inmediato a su forma original; en vez de ello, la deformación desaparece en forma gradual. Si el esfuerzo se hubiera aplicado y retirado de inmediato, el material habría regresado inmediatamente a su forma inicial. Sin embargo, el tiempo entra en acción y juega un papel al afectar el comportamiento del material.

Un modelo sencillo de viscoelasticidad se presenta con el empleo de elasticidad en un punto inicial. La ley de Hooke, $\sigma = E\epsilon$, expresa de manera concisa la elasticidad, y sólo relaciona el esfuerzo con la deformación a través de una constante de proporcionalidad. En un sólido viscoelástico, la relación entre el esfuerzo y la deformación depende del tiempo; se expresa así

$$\sigma(t) = f(t)\epsilon \tag{3.27}$$

La función del tiempo $f(t)$ se conceptualiza como un módulo de elasticidad que depende del tiempo. Podría escribirse como $E(t)$ y hacer referencia a éste como un módulo de viscoelasticidad. La forma de esta función del tiempo es compleja, a veces incluye a la deformación como factor. Aun sin entrar a sus expresiones matemáticas, es posible explorar el efecto de la dependencia del tiempo. Un efecto común se aprecia en la figura 3.20, que muestra el comportamiento esfuerzo-deformación de un polímero termoplástico sujeto a tasas de deformación diferentes. Con una tasa baja, el material

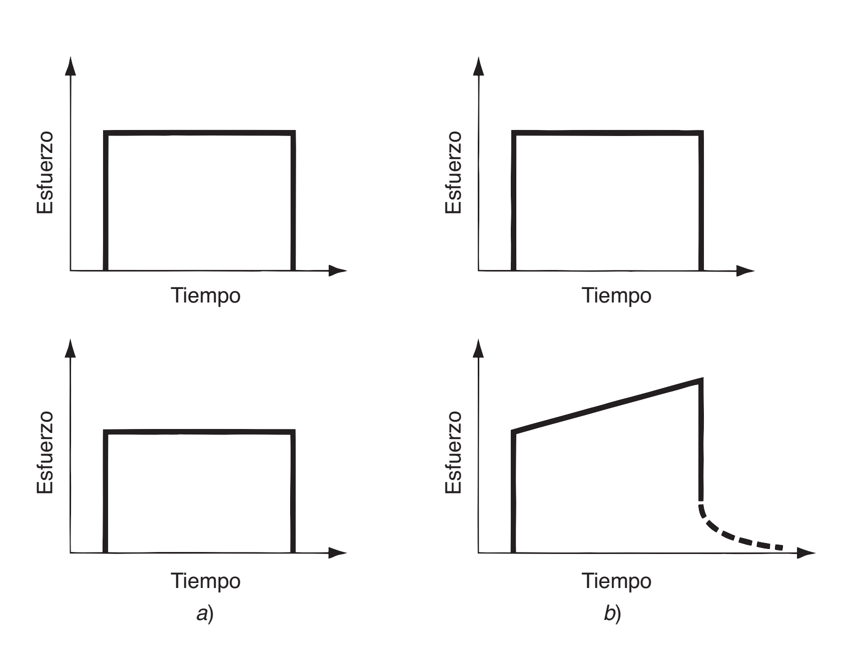


FIGURA 3.19 Comparación de propiedades elásticas y viscoelásticas: *a*) respuesta de un material perfectamente elástico ante un esfuerzo aplicado a lo largo del tiempo, y *b*) respuesta de un material viscoelástico en las mismas condiciones. En el inciso *b*), el material adopta una deformación que es función del tiempo y la temperatura.

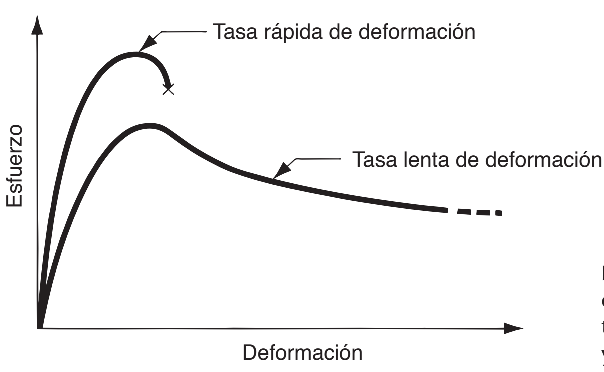


FIGURA 3.20 Curva esfuerzo-deformación de un material viscoelástico (polímero termoplástico) a tasas de deformación alta y baja.

presenta un flujo viscoso significativo. Con una tasa alta, se comporta en una forma mucho más frágil.

La temperatura es un factor de la viscoelasticidad. Conforme la temperatura se incrementa, el comportamiento viscoso se vuelve más y más prominente respecto al comportamiento elástico. El material se vuelve algo parecido a un fluido. La figura 3.21 ilustra esta dependencia de la temperatura para un polímero termoplástico. A temperaturas bajas, el polímero muestra comportamiento elástico. Conforme T aumenta por arriba de la temperatura de transición vítrea, T_g, el polímero se vuelve viscoelástico. Si la temperatura se incrementara más, se vuelve suave y como caucho. A temperaturas aún mayores, adquiere características viscosas. Las temperaturas a las que se observan estos modos de comportamiento varían en función del plástico. Asimismo, las formas del módulo *versus* la curva de temperatura difieren de acuerdo con las proporciones de estructuras cristalinas y amorfas en el termoplástico. Los polímeros termoestables o termofijos y los elastómeros se comportan en forma distinta de la que ilustra la figura; después de la vulcanización, esos polímeros no se suavizan como lo hacen los termoplásticos a temperaturas elevadas. En vez de ello se degradan (se carbonizan).

El comportamiento viscoelástico se manifiesta en la fusión de los polímeros como memoria de su forma. Conforme el polímero espeso se funde, se transforma durante el proceso de una forma a otra; "recuerda" su forma anterior y trata de volver a esa geometría. Por ejemplo, un problema común en la extrusión de polímeros es el aumento de volumen de la matriz, en el que el perfil del material extruido aumenta de tamaño, lo que refleja su tendencia a regresar a la sección transversal más grande que tenía en el boquilla de salida

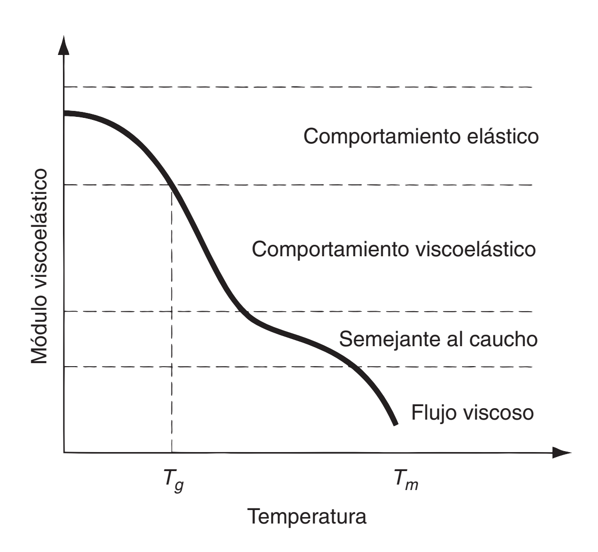


FIGURA 3.21 Módulo viscoelástico como función de la temperatura para un polímero termoplástico.

inmediatamente antes de ser empujado a través de la abertura pequeña del dado. En el estudio del moldeo del plástico se examinan con más detalle las propiedades de viscosidad y viscoelasticidad (véase el capítulo 13).

REFERENCIAS

[1] Avallone, E. A. y Baumeister III, T. (eds). ***Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers***, 10a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1996.
[2] Beer, F. P. y Russell, J. E. ***Vector Mechanics for Engineers***, 6a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.
[3] Budynas, R. G. ***Advanced Strength and Applied Stress Analysis***, 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.
[4] Chandra, M. y Roy, S. K. ***Plastics Technology Handbook***, 3a. ed. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1998.
[5] Dieter, G. E. ***Mechanical Metallurgy***, 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1986.
[6] DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R. A. ***Mate-rials and Processes in Manufacturing***, 9a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.
[7] ***Engineering Plastics***. Engineered Materials Handbook, Vol. 2, ASM International, Metals Park, Ohio, 1987.
[8] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 4a. ed. Houghton Mifflin Company, Boston, 1990.
[9] Kalpakjian, S. y Schmid, S. R. ***Manufacturing Processes for Engineering Materials***, 4a. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.
[10] ***Metals Handbook***, 10a. ed., Vol. 1, Properties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloys. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.
[11] ***Metals Handbook***, 10a. ed., Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, ASM International, Metals Park, Ohio, 1991.
[12] Morton-Jones, D. H. ***Polymer Processing***. Chapman and Hall, Londres, 1989.
[13] Schey, J. A. ***Introduction to Manufacturing Processes***, 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 2000.
[14] Van Vlack, L. H. ***Elements of Materials Science and Engineering***, 6a. ed. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., 1991.
[15] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. 3, Mate-rials, Finishing, and Coating. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

3.1. ¿Cuál es el dilema entre el diseño y la manufactura, en términos de las propiedades mecánicas?
3.2. ¿Cuáles son los tres tipos de esfuerzos estáticos a las que se sujetan los materiales?
3.3. Enuncie la ley de Hooke.
3.4. ¿Cuál es la diferencia entre el esfuerzo de ingeniería y el esfuerzo verdadero, en una prueba de tensión?
3.5. Defina la resistencia a la tensión de un material.
3.6. Defina la resistencia a la deformación de un material.
3.7. ¿Por qué no puede hacerse una conversión directa entre las medidas de la ductilidad de elongación y la reducción del área, con el uso de la suposición de volumen constante?
3.8. ¿Qué es el endurecimiento por trabajo?
3.9. ¿En qué caso el coeficiente de resistencia tiene el mismo valor que la resistencia de deformación?
3.10. ¿En qué difiere el cambio del área de la sección transversal de un espécimen de una prueba de compresión, de su contraparte en una prueba de tensión?
3.11. ¿Cuál es el factor que complica lo que sucede en una prueba de compresión?
3.12. La prueba de tensión no es apropiada para materiales duros y frágiles tales como las cerámicas. ¿Cuál es la prueba que se usa por lo común para determinar las propiedades de resistencia de dichos materiales?
3.13. ¿Cómo se relaciona el módulo de la cortante de elasticidad, G, con el módulo de tensión de elasticidad, E, en promedio?
3.14. ¿Cómo se relaciona la resistencia a la cortante, S, con la resistencia a la tensión, TS, en promedio?
3.15. ¿Qué es dureza, y cómo se prueba, generalmente?
3.16. ¿Por qué se requieren pruebas y escalas diferentes para la dureza?
3.17. Defina la temperatura de recristalización para un metal.
3.18. Defina la viscosidad de un fluido.
3.19. ¿Cuál es la característica definitoria de un fluido newtoniano?
3.20. ¿Qué es viscoelasticidad, como propiedad de un material?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 15 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

3.1. ¿Cuáles de los siguientes son los tres tipos básicos de esfuerzos estáticos a las que puede sujetarse un material? (tres respuestas correctas): *a*) compresión, *b*) dureza, *c*) reducción del área, *d*) cortante, *e*) tensión, *f*) esfuerzo verdadero, y *g*) deformación.

3.2. ¿Cuál de las que siguen es la definición correcta de la resistencia definitiva a la tensión, según se obtiene de una prueba de tensión sobre un espécimen de metal?: *a*) el esfuerzo encontrado cuando la curva esfuerzo-deformación pasa del comportamiento elástico al plástico, *b*) la carga máxima dividida entre el área final del espécimen, *c*) la carga máxima dividida entre el área original del espécimen, o *d*) el esfuerzo observado cuando el espécimen falla finalmente.

3.3. Si se midieran los valores de esfuerzo durante una prueba de tensión, ¿cuál de las siguientes sería el valor mayor?: *a*) esfuerzo de ingeniería, *b*) esfuerzo verdadero.

3.4. Si durante una prueba de tensión se midiera la deformación, ¿cuál de las siguientes tendría el valor mayor?: *a*) deformación de ingeniería, *b*) deformación verdadera.

3.5. La región plástica de la curva esfuerzo-deformación para un metal está caracterizada por una relación proporcional entre el esfuerzo y la deformación: *a*) verdadero, o *b*) falso.

3.6. ¿Cuál de los tipos siguientes de relación esfuerzo-deformación describe mejor el comportamiento de los materiales frágiles, tales como las cerámicas y los plásticos termoestables?: *a*) elástico y perfectamente plástico, *b*) elástico y dureza por deformación, *c*) perfectamente elástico, o *d*) ninguno de los anteriores.

3.7. ¿Cuál de los tipos siguientes de relación esfuerzo-deformación describe mejor el comportamiento de la mayoría de metales a temperatura ambiente?: *a*) elástico y perfectamente plástico, *b*) elástico y endurecimiento por deformación, *c*) perfectamente elástico, o *d*) ninguno de los anteriores.

3.8. ¿Cuál de los tipos siguientes de relación esfuerzo-deformación describe mejor el comportamiento de los metales a temperaturas por arriba de sus puntos de recristalización respectivos?: *a*) elástico y perfectamente plástico, *b*) elástico y endurecimiento por deformación, *c*) perfectamente elástico, o *d*) ninguno de los anteriores.

3.9. ¿Cuál de los materiales siguientes tiene el módulo de elasticidad mayor: *a*) aluminio, *b*) diamante, *c*) acero, *d*) titanio, o *e*) tungsteno?

3.10. ¿Por lo general, la resistencia a la cortante de un metal es *a*) mayor que, o *b*) menor que su resistencia a la tensión?

3.11. La mayor parte de las pruebas de dureza incluyen presionar un objeto duro en la superficie de un espécimen de prueba y medir la indentación (o su efecto) que resulta: *a*) verdadero, o *b*) falso.

3.12. ¿Cuál de los materiales que siguen tiene la dureza mayor?: *a*) cerámica de alúmina, *b*) hierro colado gris, *c*) acero endurecido para herramientas, *d*) acero al alto carbono, o *e*) poliestireno.

3.13. La viscosidad se define como la facilidad con la que un fluido fluye: *a*) verdadero, o *b*) falso.

PROBLEMAS

Resistencia y ductilidad en la tensión

3.1. Una prueba de tensión usa un espécimen de prueba que tiene una longitud de medición de 50 mm, y un área de 200 mm^2. Durante la prueba, el espécimen se vence bajo una carga de 98 000 N. La longitud de medición correspondiente es de 50.23 mm. Esto es el 0.2% del punto de deformación. La carga máxima de 168 000 N se alcanza con una longitud de medición de 64.2 mm. Determine *a*) la resistencia de vencimiento, *b*) el módulo de elasticidad, y *c*) la resistencia a la tensión.

3.2. En el problema 3.1, la fractura ocurre a una longitud de medición de 67.3 mm. *a*) Determine la elongación porcentual, *b*) si el espécimen se estrangula cuando el área es de 92 mm^2, determine la reducción porcentual del área.

3.3. El espécimen en una prueba de tensión tiene una longitud de medición de 2.0 in y un área de 0.5 in^2. Durante la prueba el espécimen se vence bajo una carga de 32 000 lb. La longitud de medición correspondiente es de 2.0083 in. Esto es el 0.2% del punto de deformación. La carga máxima de 60 000 lb se alcanza con una longitud de medición de 2.60 in. Determine *a*) la resistencia de deformación, *b*) el módulo de elasticidad, y *c*) la resistencia a la tensión.

3.4. En el problema 3.3, la fractura ocurre cuando la longitud de medición es de 2.92 in, *a*) determine la elongación porcentual. *b*) Si el espécimen se estrangula para un área de 0.25 in^2, determine la reducción porcentual del área.

3.5. Durante una prueba de tensión en la que la longitud de medición inicial es de 125.0 mm, y el área de la sección transversal es de 62.5 mm, se recaban los datos siguientes de fuerza y longitud de medición: 1) 17 793 N a 125.23 mm, 2) 23 042 N a 131.25 mm, 3) 27 579 N a 140.05 mm,

4) 28 913 N a 147.01 mm, 5) 27 578 N a 153.00 mm, y 6) 20 462 N a 160.10 mm. La carga máxima es de 28 913 N, y el último punto de los datos ocurrió inmediatamente antes de la falla. *a*) Grafique la curva de esfuerzo-deformación de ingeniería. Determine: *b*) la resistencia de deformación, *c*) el módulo de elasticidad, *d*) la resistencia a la tensión.

Curva de flujo

3.6. En el problema 3.5, determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación en la ecuación de la curva de flujo. Asegúrese de no emplear datos después del punto en que ocurrió el estrangulamiento.

3.7. En una prueba de tensión sobre un espécimen de metal, la deformación verdadera es de 0.08 con un esfuerzo de 265 MPa. Cuando el esfuerzo verdadero es de 325 MPa, la deformación verdadera es de 0.27. Determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación en la ecuación de la curva de flujo.

3.8. Durante una prueba de tensión, un metal tiene una deformación verdadera de 0.10 con un esfuerzo verdadero de 37 000 lb/in^2. Después, con un esfuerzo verdadero de 55 000 lb/in^2, la deformación verdadera es de 0.25. Determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación en la ecuación de la curva de flujo.

3.9. En una prueba de tensión, un metal comienza a estrangularse cuando la deformación verdadera es de 0.28, con un esfuerzo verdadero correspondiente de 345.0 MPa. Si el lector no supiera nada más sobre la prueba, ¿podría estimar el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación en la ecuación de la curva de flujo?

3.10. Una prueba de tensión para cierto metal proporciona los siguientes parámetros de la curva de flujo: el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.3, y el de resistencia es de 600 MPa. Determine *a*) el esfuerzo de flujo para una deformación verdadera de 1.0, y *b*) la deformación verdadera para un esfuerzo de flujo de 600 MPa.

3.11. La curva de flujo para cierto metal tiene los parámetros siguientes: el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.22, y el coeficiente de resistencia es de 54 000 lb/in^2. Determine: *a*) el esfuerzo de flujo para una deformación verdadera de 0.45, y *b*) la deformación verdadera para un esfuerzo de flujo de 40 000 lb/in^2.

3.12. Un metal se deforma en una prueba de tensión dentro de la región plástica. El espécimen tenía al principio una longitud de medición de 2.0 in, y un área de 0.50 in^2. En cierto punto de la prueba de tensión, la longitud de medida es de 2.5 in y el esfuerzo de ingeniería correspondiente es de 24 000 lb/in^2; en otro punto de la prueba, anterior al estrangulamiento, la longitud de medida es de 3.2 in, y el esfuerzo de ingeniería correspondiente es de 28 000 lb/in^2. Determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación para este metal.

3.13. Un espécimen para una prueba de tensión tiene una longitud inicial de medida de 75.0 mm. Durante la prueba se estira a una longitud de 110.0 mm antes de que ocurriera el estrangulamiento. Determine *a*) la deformación de ingeniería, y *b*) la deformación verdadera. *c*) Calcule y sume las deformaciones de ingeniería conforme el espécimen se estira de: 1) 75.0 a 80.0 mm, 2) 80.0 a 85.0 mm, 3) 85.0 a 90.0 mm, 4) 90.0 a 95.0 mm, 5) 95.0 a 100.0 mm, 6) 100.0 a 105.0 mm, y 7) 105.0 a 110.0 mm. *d*) ¿El resultado está más cerca de la respuesta del inciso *a* o a la del *b*? ¿Ayuda esto a demostrar lo que significa el término deformación verdadera?

3.14. Un espécimen de prueba de tensión se estira al doble de su longitud original. Determine la deformación de ingeniería y la deformación verdadera para la prueba. Si el metal se había deformado durante la compresión, determine la longitud final que se comprimió el espécimen, de modo que *a*) la deformación de ingeniería sea igual al mismo valor que en la tensión (será un valor negativo debido a la compresión), y *b*) la deformación verdadera sea igual al mismo valor que en la tensión (otra vez, será un valor negativo debido a la compresión). Obsérvese que la respuesta al inciso *a*) es un resultado imposible. Por tanto, la deformación verdadera es una medición mejor durante la deformación plástica.

3.15. Obtenga una expresión para la deformación verdadera como función de D y D_o para un espécimen de prueba de tensión de sección transversal circular, donde D = diámetro instantáneo del espécimen, y D_o es su diámetro original.

3.16. Demuestre que la deformación verdadera es igual a $\ln(1 + e)$, donde e = deformación de ingeniería.

3.17. Con base en los resultados de una prueba de tensión, la curva de flujo tiene los parámetros siguientes: el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.40, y el de resistencia es de 551.6 MPa. Con base en esta información, calcule la resistencia a la tensión (de ingeniería) del metal.

3.18. Un alambre de cobre de 0.80 mm de diámetro, falla para un esfuerzo de ingeniería de 248.2 MPa. Su ductilidad se mide como el 75% de reducción del área. Determine el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera en la falla.

3.19. Un espécimen de acero de una prueba de tensión, con longitud inicial de medición de 2.0 in, y área de sección transversal de 0.5 in^2, alcanza una carga máxima de 37 000 lb. Su elongación en este punto es de 24%. Determine el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera para esta carga máxima.

Compresión

3.20. Una aleación metálica ha sido probada a la tensión, con los resultados siguientes para los parámetros de la curva de flujo: coeficiente de resistencia de 620.5 MPa, y exponente de endurecimiento por deformación de 0.26. Luego, el mismo metal se prueba a la compresión en que la altura inicial del espécimen es de 62.5 mm con diámetro de 25 mm. Suponga que la sección transversal se incrementa de modo uniforme y determine la carga que se requiere para comprimir el espécimen a una altura de *a*) 50 mm, y *b*) 37.5 mm.

3.21. Los parámetros de la curva de flujo para cierto acero inoxidable son los que siguen: coeficiente de resistencia de 1 100 MPa, y exponente de endurecimiento por deformación de 0.35. Un espécimen cilíndrico con área inicial de sección transversal igual a 1 000 mm^2 y altura de 75 mm, se comprime a una altura de 58 mm. Determine la fuerza requerida

para lograr esa compresión, suponiendo que la sección transversal se incrementa de modo uniforme.

3.22. Un espécimen de acero (módulo de elasticidad de 30×10^6 lb/in^2) para una prueba de compresión tiene una altura inicial de 2.0 in y diámetro de 1.5 in. El metal se vence (0.2% de desplazamiento) con una carga de 140 000 lb. Para una carga de 260 000 lb, la altura se ha reducido a 1.6 in. Determine: *a*) la resistencia de deformación, y *b*) los parámetros de la curva de flujo (coeficiente de resistencia y exponente de endurecimiento por deformación). Suponga que el área de la sección transversal se incrementa uniformemente durante la prueba.

Doblamiento y cortante

3.23. Se utiliza una prueba de flexión para cierto material duro. Si se sabe que la resistencia a la ruptura transversal del material es de 1 000 MPa, ¿cuál es la carga anticipada a la que es probable que falle el espécimen, dado que sus dimensiones son: 15 mm de ancho de la sección transversal, 10 mm de espesor de la sección transversal, y 60 mm de longitud?

3.24. Un espécimen de cerámica especial se prueba a la flexión. Sus dimensiones son las siguientes: ancho de la sección transversal igual a 0.50 in, y espesor de la sección transversal de 0.25 in. La longitud del espécimen entre los apoyos es de 2.0 in. Determine la resistencia a la ruptura transversal si la falla ocurre con una carga de 1 700 lb.

3.25. Una pieza de metal se deforma a la cortante con un ángulo de 42º, como se aprecia en la figura P3.25. Para esta situación, determine la deformación por cortante.

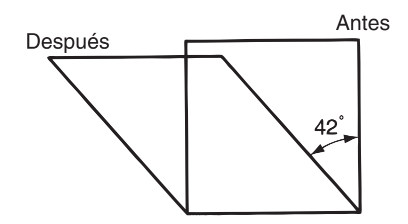


FIGURA P3.25

3.26. Un espécimen de prueba a la torsión tiene un radio de 25 mm, espesor de pared de 3 mm y longitud de medición de 50 mm. Durante la prueba, un par de 900 N-m da como resultado una deflexión angular de 0.3º. Determine *a*) el esfuerzo cortante, *b*) la deformación por cortante, y *c*) el módulo de la cortante, si se supone que el espécimen aún no se ha vencido.

3.27. En el problema 3.26, la falla del espécimen ocurre para un par de 1 200 N-m, y una deflexión angular correspondiente de 10º. ¿Cuál es la resistencia a la cortante del metal?

3.28. En una prueba de torsión, se aplica un par de 5 000 ft-lb que ocasiona una deflexión angular de 1º sobre un espécimen tubular de pared delgada cuyo radio es de 1.5 in, el espesor de la pared es de 0.10 in, y la longitud de medida es de 2.0 in. Determine *a*) el esfuerzo cortante, *b*) la deformación por cortante, y *c*) el módulo de la cortante, si se supone que el espécimen aún no se ha vencido.

3.29. En el problema 3.28, el espécimen falla con un par de 8 000 ft-lb, y una deflexión angular de 23º. Calcule la resistencia a la cortante del metal.

Dureza

3.30. En una prueba de dureza de Brinell, se aplica una carga de 1 500 kg sobre un espécimen, con el empleo de una bola de acero endurecido de 10 mm de diámetro. La indentación resultante tiene un diámetro de 3.2 mm. Determine el número de dureza de Brinell para el metal.

3.31. En el problema 3.30, suponga que el espécimen es de acero. Con base en el número de dureza de Brinell que se determinó en ese problema, estime la resistencia a la tensión del acero.

3.32. Uno de los inspectores del departamento de control de calidad ha usado con frecuencia las pruebas de dureza de Brinell y de Rockwell, para las que la compañía cuenta con el equipo. Él afirma que todas las pruebas de dureza se basan en el mismo principio que en la de Brinell, que consiste en que la dureza siempre se mide como la carga que se aplica dividida entre el área de las impresiones que deja un indentor. *a*) ¿Está en lo correcto? *b*) Si no es así, ¿cuáles son los otros principios involucrados al probar la dureza, y cuáles serían las pruebas asociadas?

3.33. Se acaba de recibir del proveedor un lote de acero templado. Se supone que tiene una resistencia a la tensión en el rango de 60 000 a 70 000 lb/in^2. Una prueba de dureza de Brinell en el departamento de recepción da un valor de HB = 118. *a*) ¿Cumple el acero con la especificación para la resistencia a la tensión? *b*) Estime la resistencia de deformación del material.

Viscosidad de fluidos

3.34. Dos placas planas, separadas por un espacio de 4 mm, se mueven una respecto de la otra a una velocidad de 5 m/s. El espacio entre ellas está ocupado por un fluido de viscosidad desconocida. Al movimiento de las placas se opone un esfuerzo cortante de 10 Pa, debido a la viscosidad del fluido. Si se supone que el gradiente de velocidad del fluido es constante, determine el coeficiente de viscosidad del fluido.

3.35. Dos superficies paralelas, separadas por un espacio de 0.5 in ocupado por un fluido, se mueven una con respecto de la otra a una velocidad de 25 in/s. Un esfuerzo cortante opone una resistencia de 0.3 lb/in^2 al movimiento, debido a la viscosidad del fluido. Si el gradiente de velocidad en el espacio entre las superficies es constante, determine la viscosidad del fluido.

3.36. Una flecha de 125.0 mm de diámetro gira dentro de un cojinete estacionario cuyo diámetro interior es de 125.6 mm, y su longitud es de 50.0 mm. En el claro entre la flecha y el cojinete se localiza un aceite lubricante cuya viscosidad es de 0.14 Pas. La flecha gira con una velocidad de 400 rev/min; esta velocidad y la acción del aceite son suficientes para mantener a la flecha centrada dentro del cojinete. Determine la magnitud del par debido a la viscosidad, que actúa como resistencia a la rotación de la flecha.

4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Las propiedades físicas, este término es usado comúnmente para definir el comportamiento de los materiales en respuesta a fuerzas físicas distintas de las mecánicas. Incluyen las propiedades volumétricas, térmicas, eléctricas y electroquímicas. Los componentes de un producto deben hacer más que tan sólo soportar los esfuerzos mecánicos. Deben conducir la electricidad (o impedir su conducción), permitir la transferencia de calor (o su escape), transmitir la luz (o bloquear su transmisión), y satisfacer muchas otras funciones.

Las propiedades físicas son importantes en la manufactura porque es frecuente que influyan en el rendimiento del proceso. Por ejemplo, las propiedades térmicas del material de trabajo en el maquinado determinan la temperatura de corte, lo que afecta el tiempo que puede usarse la herramienta antes de que falle. En la microelectrónica, las propiedades eléctricas del silicio y la forma en la que lo alteran distintos productos químicos y procesos físicos, forman la base de la manufactura de los semiconductores.

En este capítulo se estudian las propiedades físicas más importantes para la manufactura —propiedades que se encontrarán en capítulos posteriores del libro—. Se dividen en categorías grandes tales como volumétricas, térmicas, eléctricas, etcétera. También se relaciona estas propiedades con la manufactura, como en el capítulo anterior se hizo con las propiedades mecánicas.

4.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS Y DE FUSIÓN

Estas propiedades se relacionan con el volumen de los sólidos y la manera en que las afecta la temperatura. Incluyen la densidad, expansión térmica y punto de fusión. Se explican a continuación y en la tabla 4.1 se da una lista de valores típicos para materiales seleccionados de la ingeniería.

4.1.1 Densidad

En la ingeniería, la densidad de un material es su peso por unidad de volumen. Su símbolo es ρ, y las unidades comunes son g/cm^3 (lb/in^3). La densidad de un elemento está determinada por su número atómico y otros factores tales como el radio atómico y la manera en la que sus átomos se compactan. El término ***gravedad específica*** expresa la densidad de un material en relación con la densidad del agua y por tanto es una razón adimensional.

La densidad es una consideración importante en la selección de un material para una aplicación dada, pero generalmente no es la única propiedad de interés. La resistencia también es importante, y con frecuencia las dos propiedades se relacionan con una ***razón resistencia a peso***, que es la resistencia a la tensión del material dividida entre su densidad. La razón es útil para comparar materiales para aplicaciones estructurales en los aviones, automóviles y otros productos en los que el peso y la energía importan.

TABLA 4.1 Propiedades volumétricas en unidades tradicionales de Estados Unidos para materiales seleccionados de la ingeniería.

	Densidad, ρ,		Coeficiente de expansión térmica, α		Punto de fusión, T_m	
Material	g/cm^3	lb/in^3	°C^{-1} × 10^{-6}	°F^{-1} × 10^{-6}	°C	°F
Metales						
Aluminio	2.70	0.098	24	13.3	660	1 220
Cobre	8.97	0.324	17	9.4	1 083	1 981
Fierro	7.87	0.284	12.1	6.7	1 539	2 802
Plomo	11.35	0.410	29	16.1	327	621
Magnesio	1.74	0.063	26	14.4	650	1 202
Níquel	8.92	0.322	13.3	7.4	1 455	1 651
Acero	7.87	0.284	12	6.7	a	a
Estaño	7.31	0.264	23	12.7	232	449
Tungsteno	19.30	0.697	4.0	2.2	3 410	6 170
Zinc	7.15	0.258	40	22.2	420	787
Cerámicos						
Vidrio	2.5	0.090	1.8–9.0	1.0–5.0	b	b
Alúmina	3.8	0.137	9.0	5.O	ND	ND
Sílice	2.66	0.096	ND	ND	b	b
Polímeros						
Resinas fenólicas	1.3	0.047	60	33	c	c
Nailo	1.16	0.042	100	55	b	b
Teflón	2.2	0.079	100	55	b	b
Caucho natural	1.2	0.043	80	45	b	b
Polietileno:						
Baja densidad	0.92	0.033	180	100	b	b
Alta densidad	0.96	0.035	120	66	b	b
Poliestireno	1.05	0.038	60	33	b	b

Compilado de las referencias [2], [4], [5], [6] y otras fuentes.

[a] Las características de fusión del acero dependen de su composición.

[b] Se ablandan a temperaturas elevadas y no tienen un punto de fusión bien definido.

[c] Se degradan químicamente a temperaturas elevadas. ND = no disponible; el valor de la propiedad para este material podría no ser obtenido.

4.1.2 Expansión térmica

La densidad de un material es función de la temperatura. La relación general es que la densidad disminuye con el aumento de temperatura. Dicho de otra forma, el volumen por unidad de peso se incrementa con la temperatura. Expansión térmica es el nombre que se da a este efecto que la temperatura tiene sobre la densidad. Por lo general se expresa como ***coeficiente de expansión térmica***, que mide el cambio de longitud por grado de temperatura, como mm/mm/°C (in/in/°F). Es una razón de longitud en vez de una de volumen, debido a que es más fácil de medir y aplicar. Es consistente con la situación habitual en el diseño en la que los cambios de dimensión tienen más interés que los volumétricos. El cambio de longitud correspondiente a un cambio dado de temperatura lo da la ecuación:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1 (T_2 - T_1) \tag{4.1}$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica, $°C^{-1}$ ($°F^{-1}$); y L_1 y L_2 son longitudes, mm (in), que corresponden, respectivamente, a las temperaturas T_1 y T_2, °C (°F).

Los valores del coeficiente de expansión térmica dados en la tabla 4.1 sugieren que éste tiene una relación lineal con la temperatura. Eso únicamente es una aproximación. No sólo la longitud es afectada por la temperatura, sino que el coeficiente de expansión térmica en sí también se ve afectado. Para ciertos materiales, se incrementa con la temperatura; para otros, disminuye. En general, esos cambios no son lo bastante significativos para prestarles mucha atención, y valores como los de la tabla son muy útiles en los cálculos del diseño para el rango de temperaturas de servicio. Los cambios en el coeficiente son más sustanciales cuando el metal pasa por una fase de transformación, por ejemplo de sólido a líquido, o de una estructura cristalina a otra.

En las operaciones de manufactura, la expansión térmica tiene un buen uso en el ajuste por contracción y en los ensambles de ajuste por expansión (véase la sección 33.3.2), en los que un elemento se calienta para incrementar su tamaño o se enfría para disminuirlo, a fin de permitir su inserción en alguna otra parte. Cuando el elemento regresa a la temperatura ambiente, se obtiene un ensamble con ajuste muy estrecho. La expansión térmica puede ser un problema en el tratamiento térmico (véase el capítulo 27) y en las soldaduras por fusión (véase la sección 31.6.1) debido a las fuerzas térmicas que se presentan en el material durante esos procesos.

4.1.3 Características de fusión

Para un elemento puro, el ***punto de fusión***, T_m, es la temperatura a la que el material pasa del estado sólido al líquido. La transformación inversa, de líquido a sólido, ocurre a la misma temperatura y se denomina ***punto de enfriamiento***. Para elementos cristalinos, como los metales, las temperaturas de fusión y enfriamiento son las mismas. A esa temperatura, con objeto de efectuar la transformación de sólido a líquido se requiere cierta cantidad de energía calorífica, llamada ***calor de fusión***.

La fusión de un elemento metálico a una temperatura específica, como se ha descrito aquí, supone condiciones de equilibrio. En la naturaleza hay excepciones; por ejemplo, cuando se enfría un metal fundido, permanece en estado líquido por debajo de su punto de enfriamiento si la formación de núcleos de cristales no se inicia de inmediato. Cuando esto pasa, se dice que el líquido está ***superfrío***.

Hay otras variaciones en el proceso de fusión, para materiales distintos, hay diferencias en la forma de fusión. Por ejemplo, a diferencia de los metales puros, la mayor parte de aleaciones metálicas no tienen un solo punto de fusión. En vez de ello, la fusión comienza a cierta temperatura, llamada ***solidus***, y continúa conforme la temperatura aumenta hasta que por último se convierten por completo al estado líquido a una temperatura denominada ***liquidus***. Entre las dos temperaturas, la aleación es una mezcla de metales sólidos y fundidos, la

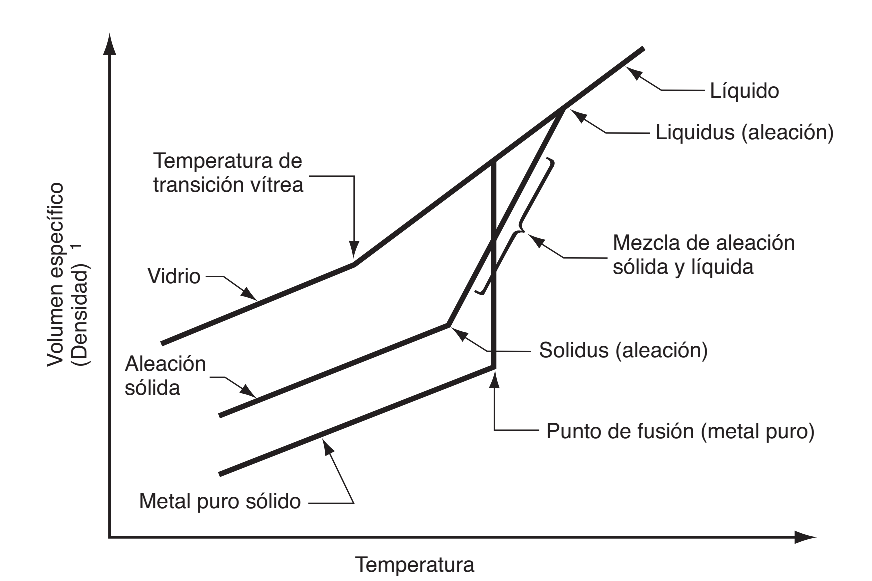


FIGURA 4.1 Cambios de volumen por unidad de peso (1/densidad) como función de la temperatura para un metal puro hipotético, aleación y vidrio; todos muestran características similares de expansión térmica y fusión.

cantidad de cada uno de los cuales es inversamente proporcional a sus distancias relativas a cada uno de los puntos. Aunque la mayoría de aleaciones se comportan de esta manera, las excepciones son las aleaciones eutécticas que se funden (y congelan) a una temperatura única. En el capítulo 6 se estudian estos temas en el análisis de los diagramas de fase.

Otra diferencia en la fusión ocurre en los materiales no cristalinos (vidrios). En ellos hay una transición gradual de los estados sólidos a los líquidos. El material sólido se suaviza en forma gradual conforme la temperatura aumenta, por último se hace líquido en el punto de fusión. Durante el ablandamiento, el material tiene una consistencia de plasticidad creciente (cada vez más como un fluido) según se acerca al punto de fusión.

En la figura 4.1 se ilustran estas diferencias en las características del punto de fusión para los metales puros, aleaciones y vidrio. Las gráficas muestran cambios en la densidad como función de la temperatura para tres materiales hipotéticos: un metal puro, aleación y vidrio. En la figura está graficado el cambio volumétrico, que es el recíproco de la densidad.

Es obvia la importancia que tiene la fusión en la manufactura. En la fundición de metal (véanse los capítulos 10 y 11), el metal se funde y luego se vierte en la cavidad de un molde. Los metales con puntos de fusión bajos por lo general son más fáciles de fundir, pero si la temperatura de fusión es demasiado baja, el metal pierde su aplicabilidad como material de ingeniería. Las características de fusión de los polímeros son importantes en el moldeo de plásticos y otros procesos de dar forma a polímeros (véase el capítulo 13). El sinterizado de metales y cerámicas pulverizados requiere el conocimiento de los puntos de fusión. El sinterizado no funde los materiales, pero las temperaturas que se usan en el proceso deben acercarse al punto de fusión a fin de lograr la unión requerida de los polvos.

4.2 PROPIEDADES TÉRMICAS

Gran parte de la sección anterior tiene que ver con los efectos de la temperatura sobre las propiedades volumétricas de los materiales. Ciertamente, la expansión térmica, fusión y temperatura de fusión son propiedades térmicas porque la temperatura determina el nivel de energía térmica de los átomos, lo que lleva a cambios en los materiales. En esta sección se examinan varias propiedades térmicas adicionales —las que se relacionan con el almacenamiento y flujo del calor dentro de una sustancia. Las propiedades usuales de interés son el calor específico y la conductividad térmica, algunos de cuyos valores se encuentran en la tabla 4.2, para materiales seleccionados.

4.2.1 Calor específico y conductividad térmica

El ***calor específico*** *C* de un material se define como la cantidad de energía calorífica requerida para incrementar la temperatura de una unidad de masa del material en un grado. En la tabla 4.2 se enlistan algunos valores comunes. A fin de determinar la cantidad de energía necesaria para calentar cierto peso de metal en un horno a una temperatura alta dada, se emplea la ecuación siguiente:

$$H = C\,W(T_2 - T_1) \tag{4.2}$$

donde H es la cantidad de energía calorífica, J (Btu); C es el calor específico del material, J/kg °C (Btu/lb °F); W es su peso, kg (lb) y $(T_2 - T_1)$ es el cambio de temperatura, °C (°F).

Es frecuente que sea de interés la capacidad de almacenamiento calorífico volumétrico de un material. Ésa es tan sólo la densidad multiplicada por el calor específico, ρC. Así, el ***calor específico volumétrico*** es la energía calorífica que se requiere para elevar en un grado la temperatura de una unidad de volumen del material, J/mm^3 °C (Btu/in^3 °F).

La conducción es un proceso fundamental de transferencia de calor. Incluye la transferencia de energía térmica dentro de un material de molécula a molécula sólo por medio de movimientos térmicos; no hay transferencia de masa. Por tanto, la conductividad térmica de una sustancia es su capacidad para transferir calor a través de sí misma por este mecanismo físico. Se mide con el ***coeficiente de conductividad térmica***, k, cuyas unidades comunes son J/s mm °C (Btu/in h °F). Generalmente, el coeficiente de conductividad térmica es elevado en los metales y bajo en los cerámicos y los plásticos.

En el análisis de la transferencia de calor es frecuente encontrar la razón de conductividad térmica a calor específico volumétrico. Se denomina ***difusión térmica***, K y se determina con

$$K = \frac{k}{\rho C} \tag{4.3}$$

Se hace uso de ésta para calcular las temperaturas de corte en el maquinado (véase la sección 21.5.1).

TABLA 4.2 Valores de propiedades térmicas comunes para materiales seleccionados. Los valores son para la temperatura ambiente, y cambian para temperaturas diferentes.

Material	Calor específico Cal/g °C[a] o Btu/lbm °F	Conductividad térmica J/s mm °C	Conductividad térmica Btu/hr in °F	Material	Calor específico Cal/g °C[a] o Btu/lbm °F	Conductividad térmica J/s mm °C	Conductividad térmica Btu/hr in °F
Metales				***Cerámicas***			
Aluminio	0.21	0.22	9.75	Alúmina	0.18	0.029	1.4
Hierro colado	0.11	0.06	2.7	Concreto	0.2	0.012	0.6
Cobre	0.092	0.40	18.7	***Polímeros***			
Hierro	0.11	0.072	2.98	Fenólicos	0.4	0.00016	0.0077
Plomo	0.031	0.033	1.68	Polietileno	0.5	0.00034	0.016
Magnesio	0.25	0.16	7.58	Teflón	0.25	0.00020	0.0096
Níquel	0.105	0.070	2.88	Caucho natural	0.48	0.00012	0.006
Acero	0.11	0.046	2.20	***Otros***			
Acero inoxidable[b]	0.11	0.014	0.67	Agua (líquida)	1.00	0.0006	0.029
Estaño	0.054	0.062	3.0	Hielo	0.46	0.0023	0.11
Zinc	0.091	0.112	5.41				

Compilada de las referencias [2], [3], [6] y otras fuentes.

[a] El calor específico tiene el mismo valor numérico en Btu/lbm-F o Cal/g-C. 1.0 caloría = 4.186 Joule.

[b] Acero inoxidable austenítico (18-8).

4.2.2 Propiedades térmicas en la manufactura

Las propiedades térmicas juegan un papel importante en la manufactura debido a que en muchos de sus procesos es común que se genere calor. En ciertas operaciones, el calor es la energía que lleva a cabo el proceso; en otros, el calor se genera como consecuencia del proceso.

El calor específico es de interés por varias razones. En procesos que requieren el calentamiento del material (por ejemplo, fundición, tratamiento térmico y forja de metales calientes), el calor específico determina la cantidad de energía calorífica necesaria para elevar la temperatura al nivel deseado, de acuerdo con la ecuación (4.2).

En muchos procesos que se efectúan a temperatura ambiente, la energía mecánica que ejecuta la operación se convierte en calor, lo que eleva la temperatura del elemento que se trabaja. Esto es común en el maquinado y forjado en frío de los metales. El aumento de temperatura es función del calor específico del metal. Es frecuente que en el maquinado se utilicen refrigerantes para reducir dichas temperaturas, y en este caso es crítica la capacidad calorífica del fluido. Casi siempre se emplea agua como la base de esos fluidos debido a su gran capacidad de absorción de calor.

La conductividad térmica funciona para disipar el calor de los procesos de manufactura, unas veces en forma benéfica y otras no. En los procesos mecánicos tales como la forja y maquinado de metal, gran parte de la potencia requerida para operar el proceso se convierte en calor. En esos procesos es muy deseable que el material de trabajo y las herramientas tengan la capacidad de conducir el calor.

Por otro lado, la conductividad térmica elevada del metal de trabajo no es deseable en los procesos de soldadura por fusión, como la soldadura por arco eléctrico. En estas operaciones, la entrada de calor debe concentrarse en la ubicación de la junta de modo que el metal pueda fundirse. Por ejemplo, en general el cobre es difícil de soldar debido a que su elevada conductividad térmica permite que el calor pase con demasiada rapidez de la fuente de energía al resto del elemento, lo que inhibe su acumulación para fundir la unión.

4.3 DIFUSIÓN DE MASA

Además de la transferencia de calor en un material, también existe la transferencia de masa. La ***difusión de masa*** involucra el movimiento de átomos o moléculas dentro de un material o a través de una frontera entre dos materiales en contacto. Quizá sea más comprensible para la intuición que ese fenómeno ocurra en líquidos y gases, pero también se da en los sólidos. Ocurre en los metales puros, en aleaciones y entre los materiales que comparten una interfase común. Debido a la agitación térmica de los átomos de un material (sólido, líquido o gas), los átomos se mueven en forma continua. En los líquidos y gases, donde el nivel de agitación térmica es alto, es un movimiento aleatorio. En los sólidos (en particular en los metales), el movimiento atómico se facilita por los vacíos y otras imperfecciones de la estructura cristalina.

Para el caso de dos metales que entran en contacto cercano de súbito, la difusión se ilustra por medio de la serie de dibujos de la figura 4.2. Al principio, ambos metales tienen su propia estructura atómica; pero con el tiempo hay un intercambio de átomos, no sólo a través de la frontera sino dentro de las piezas por separado. Con tiempo suficiente, el ensamble de las dos piezas alcanzará al final una composición uniforme en todo el conjunto.

La temperatura es un factor importante en la difusión. A temperaturas altas, la agitación térmica es mayor y los átomos se mueven con más libertad. Otro factor es el gradiente de concentración dc/dx, que indica la concentración de los dos tipos de átomos en una dirección de interés definida por x. En la figura 4.2*b*) está graficado el gradiente de concentración, para corresponder con la distribución instantánea de los átomos del ensamble. La

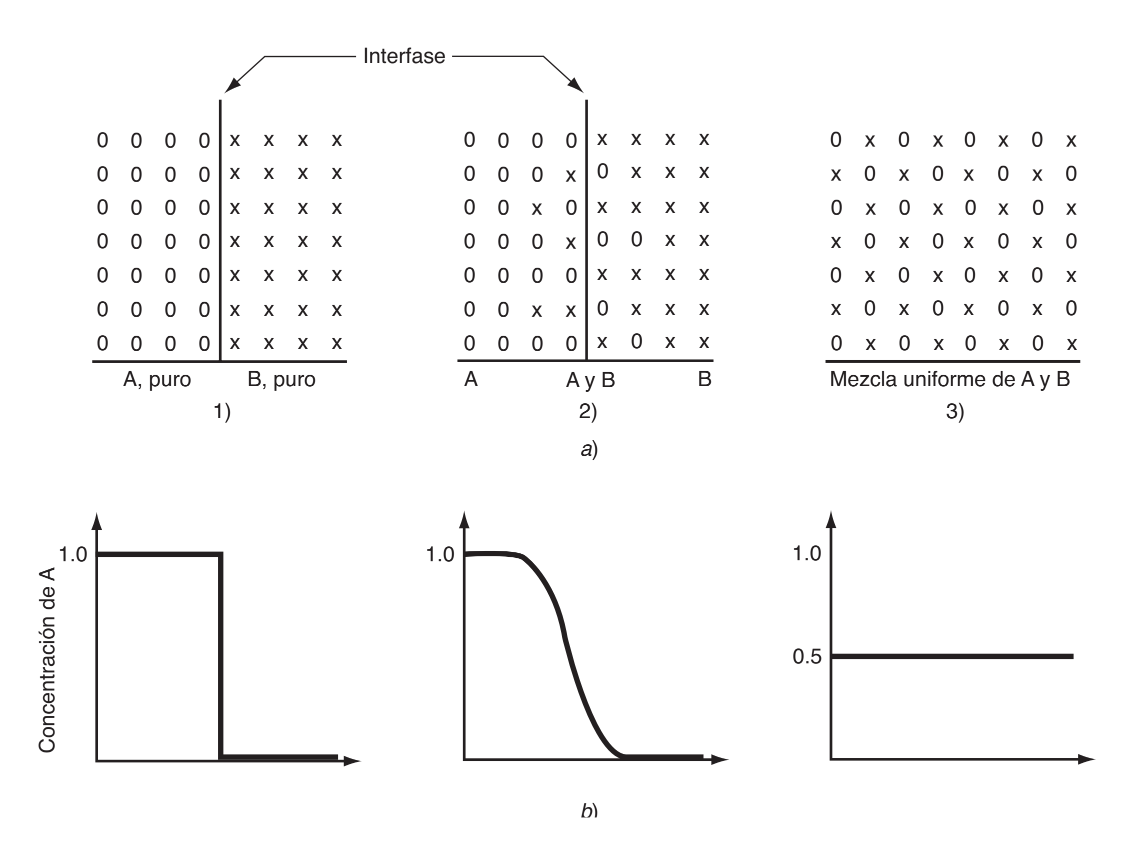


FIGURA 4.2 Difusión de masa: *a*) modelo de átomos en dos bloques sólidos en contacto: 1) al principio, cuando las dos piezas se juntan, cada una tiene su composición individual; 2) después de cierto tiempo ha ocurrido un intercambio de átomos; y 3) finalmente, sucede una condición de concentración uniforme. El gradiente de concentración *dc*/*dx* para el metal A, está graficado en el inciso *b*) de la figura.

relación que se emplea con frecuencia para describir la difusión de masa es la ***primera ley de Fick***:

$$dm = -D\left(\frac{dc}{dt}\right)A\ dt \tag{4.4}$$

donde dm es la pequeña cantidad de material transferido, D es el coeficiente de difusión del metal, que se incrementa con rapidez con la temperatura, dc/dx es el gradiente de concentración, A es el área de la frontera, y dt representa un incremento pequeño de tiempo. Una expresión alternativa de la ecuación (4.4) da la tasa de difusión de masa:

$$\frac{dm}{dt} = -D\left(\frac{dc}{dt}\right)A \tag{4.5}$$

Aunque estas ecuaciones son difíciles de utilizar en los cálculos debido al problema de evaluar D, son de utilidad para comprender la difusión y las variables de las que depende D.

La difusión de masa se utiliza en varios procesos. Cierto número de tratamientos de endurecimiento de la superficie se basan en ella (véase la sección 27.4), incluyendo la carburización y la nitruración. Entre los procesos de soldadura por fusión, la que es por difusión (véase la sección 31.5.2) se emplea para unir dos componentes por medio de comprimirlos y permitir que ocurra la difusión a través de la frontera para crear una unión permanente. La difusión también se utiliza en la manufactura electrónica para alterar la química de la superficie de un chip semiconductor en regiones muy localizadas, a fin de crear detalles del circuito (véase la sección 35.4.3).

4.4 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

Los materiales de ingeniería muestran mucha variación en su capacidad de conducir la electricidad. En esta sección se definen las propiedades físicas por medio de las cuales se mide dicha capacidad.

4.4.1 Resistividad y conductividad

El flujo de una corriente eléctrica involucra el movimiento de ***portadores de carga*** —es decir, partículas infinitesimalmente pequeñas que poseen carga eléctrica. En los sólidos, esos portadores de carga son los electrones. En una solución líquida, los portadores de carga son los iones positivos y negativos. El movimiento de los portadores de carga está favorecido por la presencia de voltaje eléctrico, y se le oponen las características inherentes del material, tales como la estructura atómica y los límites entre los átomos y moléculas. La siguiente es la relación familiar definida por la ley de Ohm:

$$I = \frac{E}{R} \tag{4.6}$$

donde I es la corriente, A; E es el voltaje, V; y R es la resistencia eléctrica, Ω. La resistencia en una sección uniforme de material (por ejemplo, un conductor) depende de su longitud L, área de la sección transversal, A, y la resistividad del material, r; así,

$$R = r\frac{L}{A} \qquad \text{o} \qquad r = R\frac{A}{L} \tag{4.7}$$

donde la resistividad tiene las unidades de Ω-m^2/m o Ω-m (Ω-in). La ***resistividad*** es la propiedad básica que define la capacidad que un material tiene para oponerse al flujo de la corriente. La tabla 4.3 enlista los valores de resistividad para materiales seleccionados. La resistividad no es constante; por el contrario, varía, como tantas otras propiedades, con la temperatura. Para los metales, aumenta con la temperatura.

Con frecuencia, es más conveniente considerar a un material como conductor de la energía eléctrica más que como si se opusiera a su flujo. La ***conductividad*** de un material es tan sólo el recíproco de la resistividad:

$$\text{Concavidad eléctrica} = \frac{1}{r} \tag{4.8}$$

donde la conductividad se expresa en las unidades de (Ω-m)$^{-1}$ [(Ω-in)$^{-1}$].

4.4.2 Clases de materiales según sus propiedades eléctricas

Los metales son los mejores ***conductores*** de la electricidad, debido a sus enlaces metálicos. Tienen la resistividad más baja (véase la tabla 4.3). La mayoría de las cerámicas y los polímeros, cuyos electrones tienen enlaces estrechos covalentes o iónicos, son malos conductores. Muchos de esos materiales se emplean como ***aislantes*** porque poseen resistividades elevadas.

En ocasiones, a un aislante se le denomina ***dieléctrico***, porque ese término significa que no es conductor de corriente directa. Es un material que se puede colocar entre dos electrodos sin que conduzca la corriente entre ellos. Sin embargo, si el voltaje es suficientemente alto, la corriente pasará de súbito a través del material, por ejemplo en forma de un arco. La ***resistencia dieléctrica*** de un material aislante es, entonces, el potencial eléctrico que se requiere para romper el aislamiento por unidad de espesor. Las unidades apropiadas son volts/m (volts/in).

Además de los conductores y aislantes (o dieléctricos), también hay superconductores y semiconductores. Un ***superconductor*** es un material que tiene una resistividad igual a

TABLA 4.3 Resistividad de materiales seleccionados.

	Resistividad	
Material	Ω-m	Ω-in
Conductores	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-4} - 10^{-7}$
Aluminio	2.8×10^{-8}	1.1×10^{-6}
Aleaciones de aluminio	4.0×10^{-8} [a]	1.6×10^{-6} [a]
Hierro colado	65.0×10^{-8} [a]	25.6×10^{-6} [a]
Cobre	1.7×10^{-8}	0.67×10^{-6}
Oro	2.4×10^{-8}	0.95×10^{-6}
Hierro	9.5×10^{-8}	3.7×10^{-6}
Plomo	20.6×10^{-8}	8.1×10^{-6}
Magnesio	4.5×10^{-8}	1.8×10^{-6}
Níquel	6.8×10^{-8}	2.7×10^{-6}
Plata	1.6×10^{-8}	0.63×10^{-6}
Conductores (continúa)		
Acero, bajo C	17.0×10^{-8}	6.7×10^{-6}
Acero, inoxidable	70.0×10^{-8} [a]	27.6×10^{-6}
Estaño	11.5×10^{-8}	4.5×10^{-6}
Zinc	6.0×10^{-8}	2.4×10^{-6}
Carbono	5000×10^{-8} [b]	2000×10^{-6} [b]
Semiconductores	$10^{1} - 10^{5}$	$10^{2} - 10^{7}$
Silicio	1.0×10^{3}	
Aislantes	$10^{12} - 10^{15}$	$10^{13} - 10^{17}$
Caucho natural	1.0×10^{12} [b]	0.4×10^{14} [b]
Polietileno	100×10^{12} [b]	40×10^{14} [b]

Compilada a partir de varias fuentes estándar.
[a] El valor varía con la composición de la aleación.
[b] El valor es aproximado.

cero. Es un fenómeno que se ha observado en ciertos materiales a temperaturas bajas que se acercan al cero absoluto. Podría esperarse la existencia de este fenómeno debido al efecto tan significativo que tiene la temperatura sobre la resistividad. La existencia de dichos superconductores tiene gran interés científico. Si pudieran desarrollarse materiales con esa propiedad a temperaturas más normales, habría implicaciones prácticas significativas para la transmisión de la energía, las velocidades de conexión electrónica, y aplicaciones del campo magnético.

Los semiconductores ya han probado su utilidad práctica, pues sus aplicaciones van desde computadoras grandes a aparatos electrodomésticos y controladores de motores automotrices. Como puede suponerse, un ***semiconductor*** es un material cuya resistividad está entre la de los aislantes y la de los conductores. En la tabla 4.3 se presenta el rango normal. El material semiconductor más utilizado hoy día es el silicio (véase la sección 7.5.2), sobre todo debido a su abundancia en la naturaleza, su relativo bajo costo y facilidad de procesamiento. Lo que hace únicos a los semiconductores es su capacidad de alterar de manera significativa las conductividades en sus químicas superficiales, en áreas muy localizadas para fabricar circuitos integrados (véase el capítulo 35).

Las propiedades eléctricas desempeñan un papel muy importante en varios procesos de manufactura. Algunos de los no tradicionales usan energía eléctrica para eliminar material. El maquinado con descarga eléctrica (véase la sección 26.3.1) emplea el calor generado por la energía eléctrica en forma de chispas para eliminar material de los metales. La mayor parte de los procesos importantes de soldadura por fusión (véase el capítulo 31) utilizan energía eléctrica para fundir la unión metálica. Y como ya se mencionó, la capacidad que tienen los materiales semiconductores para alterar las propiedades eléctricas es la base de la manufactura microelectrónica.

4.5 PROCESOS ELECTROQUÍMICOS

La ***electroquímica*** es el campo de la ciencia que tiene que ver con la relación entre la electricidad y los cambios químicos, y con la conversión de las energías eléctrica y química.

En una solución acuosa, las moléculas de un ácido, base o sal, están disociadas en iones con carga positiva y negativa. Estos iones son los portadores de carga en la solución, permiten la conducción de energía eléctrica, desempeñan el mismo papel que los electrones en la conducción metálica. La solución ionizada se denomina ***electrolito***; y la conduc-

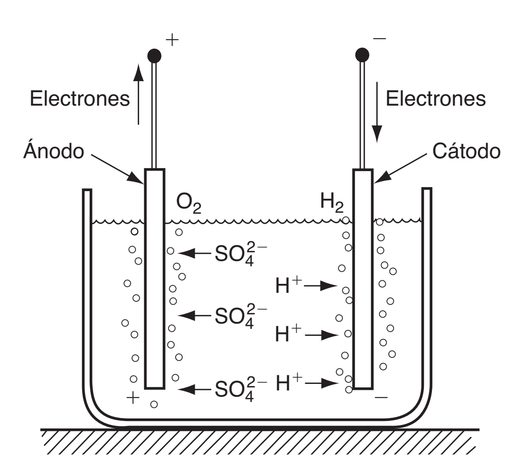


FIGURA 4.3 Ejemplo de electrólisis: la descomposición del agua.

ción electrolítica requiere que la corriente entre y salga de la solución por los ***electrodos***. El electrodo positivo se denomina ***ánodo***, y el negativo ***cátodo***. El conjunto del arreglo se denomina ***celda electrolítica***. En cada electrodo ocurre cierta reacción química, como la deposición o disolución de material, o la descomposición de un gas de la solución. El nombre que reciben los cambios químicos que ocurren en la solución es ***electrólisis***.

Considere el lector un caso específico de la electrólisis: la descomposición del agua, que se ilustra en la figura 4.3. Para acelerar el proceso, se emplea ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4) como electrolito, y como electrodos platino y carbono (ambos son químicamente inertes). El electrolito se disocia en los iones H^+ y $SO_4^=$. Los iones H^+ son atraídos al cátodo con carga negativa; al hacerlo, adquieren un electrón y se combinan en moléculas de gas hidrógeno:

$$2H^+ + 2e \rightarrow H_2(\text{gas}) \tag{4.9a}$$

Los iones $SO_4^=$ son atraídos hacia el ánodo, le transfieren electrones para formar ácido sulfúrico adicional y liberar oxígeno:

$$2SO_4^= - 4e + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4 + O_2 \tag{4.9b}$$

El producto H_2SO_4 se disocia en iones de H^+ y $SO_4^=$ de nuevo, y el proceso continúa.

Además de la producción de gases hidrógeno y oxígeno, como se ilustró en el ejemplo, la electrólisis también se utiliza en varios procesos industriales. Dos ejemplos son 1) la ***galvanoplastia*** (véase la sección 29.1.1), operación que agrega una capa delgada de cierto metal (por ejemplo, cromo) a la superficie de otro (por ejemplo, acero) para propósitos decorativos o de otra índole; y 2) el ***maquinado electroquímico*** (véase la sección 26.2), proceso en el que se retira material de la superficie de una pieza metálica. Ambas operaciones se basan en la electrólisis, ya sea para agregar o quitar material de la superficie de un elemento metálico. En la galvanoplastia, la pieza que se trabaja se coloca en el circuito electrolítico como cátodo, de modo que los iones positivos del metal de recubrimiento se ven atraídos a la pieza con carga negativa. En el maquinado electroquímico, la pieza de trabajo es el ánodo, y una herramienta con la forma adecuada es el cátodo. La acción de la electrólisis en este arreglo es eliminar metal de la superficie del elemento en regiones determinadas por la forma de la herramienta conforme penetra (avanza) con lentitud en el trabajo.

Las dos leyes físicas que determinan la cantidad de material que se deposita o retira de una superficie metálica fueron enunciadas por el científico británico Michael Faraday:

1. La masa de una sustancia liberada en una celda electrolítica es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la celda.

2. Cuando a través de celdas electrolíticas diferentes pasa la misma cantidad de electricidad, las masas de las sustancias que se liberan son proporcionales a sus equivalentes químicos.

En el tratamiento posterior de la galvanoplastia y del maquinado electroquímico, se usarán las leyes de Faraday.

REFERENCIAS

[1] Guy, A. G. y Hren, J. J. ***Elements of Physical Metallurgy***, 3a. ed. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., 1974.

[2] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[3] Kreith, F. ***Principles of Heat Transfer***, 5a. ed. Wadsworth Publishing Company, Belmont, Calif., 1996.

[4] ***Metals Handbook***, 10a. ed., Vol. 1, Properties and Selection: Iron, Steel, and High Performance Alloys. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[5] ***Metals Handbook***, 10a. ed., Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[6] Van Vlack, L. H. ***Elements of Materials Science and Engineering***, 6a. ed. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

4.1. Defina a la densidad como propiedad de los materiales.

4.2. ¿Cuál es la diferencia en las características de fusión entre un elemento de metal puro y otro de aleación?

4.3. Describa las características de fusión de un material no cristalino, como el vidrio.

4.4. Defina el calor específico como propiedad de los materiales.

4.5. ¿Qué es la conductividad térmica como propiedad de los materiales?

4.6. Defina la difusividad térmica.

4.7. ¿Cuáles son las variables importantes que afectan la difusión de masa?

4.8. Defina la resistividad como propiedad de los materiales.

4.9. ¿Por qué los metales son mejores conductores de la electricidad que las cerámicas y polímeros?

4.10. ¿Qué es la resistencia dieléctrica como propiedad de un material?

4.11. ¿Qué es un electrólito?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 12 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

4.1. ¿Cuál de los metales siguientes tiene la densidad más baja?: *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) magnesio, o *d*) estaño.

4.2. ¿Las propiedades de expansión térmica de los polímeros por lo general son: *a*) mayores que, *b*) menores que, o *c*) iguales que las de los metales?

4.3. Al calentar la mayor parte de aleaciones metálicas, la fusión comienza a cierta temperatura y concluye a otra temperatura mayor. En esos casos ¿cuál de las temperaturas siguientes marca el comienzo de la fusión?: *a*) liquidus, o *b*) solidus.

4.4 ¿Cuál de los materiales que siguen tiene el calor específico más elevado?: *a*) aluminio, *b*) concreto, *c*) polietileno, o *d*) agua.

4.5. Por lo general, se considera que el cobre es fácil de soldar debido a su elevada conductividad térmica: *a*) verdadero, o *b*) falso.

4.6. ¿La tasa de difusión de masa dm/dt a través de una frontera entre dos metales diferentes es función de cuáles de las variables siguientes? (cuatro respuestas mejores): *a*) gradiente de concentración dc/dx, *b*) área de contacto, *c*) densidad, *d*) punto de fusión, *e*) expansión térmica, *f*) temperatura, y *g*) tiempo.

4.7. ¿Cuál de los metales puros siguientes es el mejor conductor de la electricidad?: *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) oro, o *d*) plata.

4.8. ¿Un superconductor se caracteriza por…? (una respuesta es la mejor): *a*) resistividad muy baja, *b*) conductividad igual a cero, o *c*) propiedades de resistividad entre las de los conductores y los semiconductores.

4.9. ¿En una celda electrolítica, el ánodo es el electrodo que es: *a*) positivo, o *b*) negativo?

PROBLEMAS

4.1. El diámetro inicial de una flecha es de 25.00 mm. Se va a insertar en el agujero de un ensamble de ajuste por expansión. Para insertarlo con facilidad, debe reducirse el diámetro de la flecha por enfriamiento. Determine la temperatura a que debe reducirse la flecha a partir de la temperatura ambiente (20 ºC) a fin de disminuir su diámetro a 24.98 mm. Consulte la tabla 4.1.

4.2. Se construye un puente de 500 m de largo y 50 m de ancho, con vigas de acero. Para compensar el cambio de la longitud en las vigas de apoyo cuando la temperatura fluctúe, se colocan juntas de expansión. Cada una de éstas puede compensar un máximo de 100 mm de cambio de longitud. De los registros históricos se estima que las temperaturas mínima y máxima de la región serán –35 ºC y 38 ºC, respectivamente. ¿Cuál es el número mínimo de juntas de expansión que se requiere?

4.3. El aluminio tiene una densidad de 2.70 g/cm^3, a temperatura ambiente (20 ºC). Determine su densidad a 650 ºC, usando los datos de la tabla 4.1 como referencia.

4.4. En relación a la tabla 4.1, determine el incremento de la longitud de una barra de acero cuya longitud es de 10.0 in, si se calienta de la temperatura ambiente (70 ºF) a 500 ºF.

4.5. En relación con la tabla 4.2, determine la cantidad de calor requerido para incrementar la temperatura de un bloque de aluminio que mide 10 cm × 10 cm × 10 cm, de la temperatura ambiente (21 ºC) a 300 ºC.

4.6. ¿Cuál es la resistencia *R* de un trozo de alambre de cobre cuya longitud es de 10 m y diámetro de 0.10 mm? Emplee como referencia la tabla 4.3.

4.7. Un conductor de níquel con medida de 16 (0.0508 in de diámetro) conecta un solenoide a un circuito de control que mide 32.8 ft, *a*) ¿cuál es la resistencia del conductor? Use la tabla 4.3 como referencia. *b*) Si una corriente pasa a través del conductor, lo calentaría. ¿Cómo afecta esto a la resistencia?

4.8. En la década de 1960, en muchos hogares se utilizó cableado de aluminio debido al costo alto del cobre en esa época. El alambre de aluminio era de medida 12 (una medida del área de la sección transversal) y se especificaba para una corriente de 15 A. Si se empleara alambre de cobre de la misma medida para sustituir al de aluminio, ¿qué corriente debería ser capaz de conducir el alambre, si todos los demás factores, excepto la resistividad, se consideraran iguales? Suponga que la resistencia del alambre es el factor principal que determina la corriente que puede conducir, y que el área de la sección transversal y la longitud son las mismas para ambos tipos de alambre.

5 DIMENSIONES, TOLERANCIAS Y SUPERFICIES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Además de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales, otros factores que determinan el rendimiento de un producto manufacturado incluyen las dimensiones y superficies de sus componentes. Las ***dimensiones*** son los tamaños lineales o angulares de un componente, especificadas en el plano de la pieza. Las dimensiones son importantes porque determinan lo bien que se ajustan los componentes de un producto durante su ensamble. Al fabricar un componente dado, es casi imposible y muy costoso dar al elemento la dimensión nominal que se establece en el plano. En vez de ello, se permite una variación limitada de la dimensión, y la que es permisible se denomina ***tolerancia***.

Las superficies de un componente también son importantes. Afectan el desempeño del producto, el ajuste del ensamble, y la percepción estética que un consumidor potencial podría tener del producto. Una ***superficie*** es el límite exterior de un objeto con su ambiente, que puede ser otro objeto, un fluido, el espacio, o una combinación de éstos. La superficie encierra el conjunto de propiedades mecánicas y físicas.

En este capítulo se estudian las dimensiones, las tolerancias y las superficies —tres atributos especificados por el diseñador del producto—. Sus logros físicos están determinados en gran parte por los procesos de manufactura que se emplean para fabricar las piezas y los productos. En el capítulo 45, se estudia la manera de medir e inspeccionar estos atributos.

5.1 DIMENSIONES, TOLERANCIAS Y ATRIBUTOS RELACIONADOS

En esta sección se definen los parámetros básicos que usan los ingenieros de diseño para especificar las dimensiones de las características geométricas en el plano de una pieza. Los parámetros incluyen dimensiones y tolerancias, planicidad, redondez y angularidad.

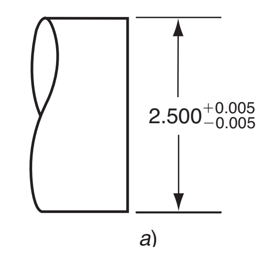
5.1.1 Dimensiones y tolerancias

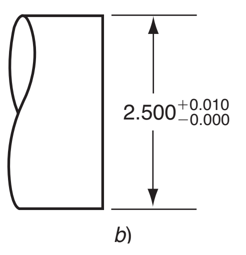
La ANSI [3] define ***dimensión*** como el "valor numérico expresado en las unidades apropiadas de medida, que se indica en un plano y otros documentos junto con líneas, símbolos y notas para definir el tamaño o característica geométrica, o ambas, de una pieza o característica de una pieza". Las dimensiones de una pieza en un plano o dibujo representan los tamaños nominales o básicos de la pieza y sus características. Éstos son los valores que el diseñador querría que la pieza tuviera, si pudiera fabricarse con un tamaño exacto, sin errores ni variaciones en el proceso de fabricación. Sin embargo, en el proceso de manufactura hay variaciones que se manifiestan como variaciones en el tamaño de la pieza. Las tolerancias se utilizan para definir los límites de la variación permitida. Al citar otra vez el estándar de ANSI [3], ***tolerancia*** es "la cantidad total que está permitido que una dimensión específica varíe. La tolerancia es la diferencia entre los límites máximo y mínimo".

Las tolerancias se especifican de modos diversos, que se ilustran en la figura 5.1. Es probable que la más común sea la ***tolerancia bilateral***, en la que se permite que la variación sea en las direcciones positiva y negativa a partir de la dimensión nominal. Por ejemplo, en la figura 5.1*a*), la dimensión nominal es de 2.500 unidades lineales (por ejemplo, mm, in), con una variación permisible de 0.005 unidades en cualquier dirección. Las piezas que estén fuera de esos límites son inaceptables. Es posible que una tolerancia bilateral esté desbalanceada; por ejemplo, 2.500 + 0.010, –0.005 unidades dimensionales. Una ***tolerancia unilateral*** es aquella en la que la variación a partir de la dimensión especificada sólo se permite en una dirección, positiva o negativa, véase la figura 5.1*b*). Las ***dimensiones límite*** son un método alternativo de especificar la variación permisible en el tamaño de un elemento de una pieza; consisten en las dimensiones máxima y mínima permitidas, como se aprecia en la figura 5.1*c*).

5.1.2 Otros atributos geométricos

Las dimensiones y tolerancias normalmente se expresan como valores lineales (longitud). Hay otros atributos geométricos de las piezas que también son importantes, tales como la planicidad de una superficie, la redondez de una flecha o agujero, el paralelismo entre dos superficies, etcétera. Las definiciones de estos términos se enlistan en la tabla 5.1.





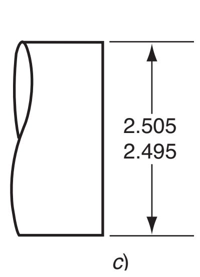


FIGURA 5.1 Tres maneras de especificar los límites de la tolerancia de una dimensión nominal de 2.500: *a*) bilateral; *b*) unilateral, y *c*) dimensiones límite.

TABLA 5.1 Definiciones de atributos geométricos de las piezas.

Angularidad – Grado en que un rasgo de una pieza, como una superficie o un eje, se encuentra con un ángulo especificado respecto de una superficie de referencia. Si el ángulo es de 90º, entonces el atributo se llama perpendicularidad o cuadratura.

Circularidad – Para una superficie de revolución como un cilindro, agujero o cono, la circularidad es el grado en que todos los puntos sobre la intersección de la superficie y un plano perpendicular al eje de revolución, se encuentran equidistantes al eje. Para una esfera, la circularidad es el grado en que todos los puntos sobre la intersección de la superficie y un plano que pasa por el centro están equidistantes de éste.

Concentricidad – Grado en que dos (o más) rasgos de una pieza, como una superficie cilíndrica y un agujero circular, tienen un eje común.

Cilindricidad – Grado en que todos los puntos sobre una superficie de revolución, como un cilindro, están equidistantes del eje de revolución.

Planicidad – Grado en que todos los puntos de una superficie se encuentran en un plano único.

Paralelismo – Grado en que todos los puntos de un rasgo de una pieza, como una superficie, una línea o un eje, están equidistantes de un plano, línea o eje de referencia.

Perpendicularidad – Grado en que todos los puntos de un rasgo de una pieza, como una superficie, una línea o un eje, están a 90° de un plano o línea o eje de referencia.

Redondez – Igual que circularidad.

Cuadratura – Igual que perpendicularidad.

Rectitud – Grado en que un rango de una pieza, como una línea o un eje, es una línea recta.

5.2 SUPERFICIES

Una superficie es aquello que tiene contacto como un barreno que al sujetarse con un objeto tal como una pieza manufacturada. El diseñador especifica las dimensiones de la pieza, relacionando las distintas superficies una con la otra. Estas ***superficies nominales*** representan el contorno relacionado con la superficie de la pieza, y están definidas por las líneas en el plano de ingeniería. Las superficies nominales aparecen como líneas absolutamente rectas, círculos ideales, agujeros redondos, y otras aristas y superficies que son perfectas en su geometría. Las superficies reales de una pieza manufacturada están determinadas por el proceso utilizado para fabricarla. La variedad de procesos disponibles en la manufactura da como resultado variaciones amplias de las características de la superficie, y es importante para los ingenieros entender la tecnología de las superficies.

Las superficies tienen importancia tecnológica y comercial por varias razones, diferentes para distintas aplicaciones de los productos: 1) razones estéticas, las superficies que son tersas y sin marcas y manchas es más probable que causen una impresión favorable en el consumidor. 2) Las superficies afectan la seguridad. 3) La fricción y el uso dependen de las características de las superficies. 4) Las superficies afectan las propiedades mecánicas y físicas; por ejemplo, los defectos de las superficies pueden ser puntos de concentración de esfuerzos. 5) El ensamblaje de las piezas se ve afectado por sus superficies; por ejemplo, la resistencia de las juntas unidas con adhesivos (véase la sección 32.3) se incrementa si las superficies tienen poca rugosidad. 6) Las superficies suaves constituyen contactos eléctricos mejores.

La ***tecnología de superficies*** tiene que ver con 1) la definición de las características de una superficie, 2) la textura de la superficie, 3) la integridad de la superficie, y 4) la relación entre los procesos de manufactura y las características de la superficie resultante. Los tres primeros temas se cubren en esta sección; el tema final se presenta en la sección 5.3.

5.2.1 Características de las superficies

Una vista microscópica de la superficie de una pieza revela sus irregularidades e imperfecciones. Los rasgos de una superficie común se ilustran en la sección transversal magnificada

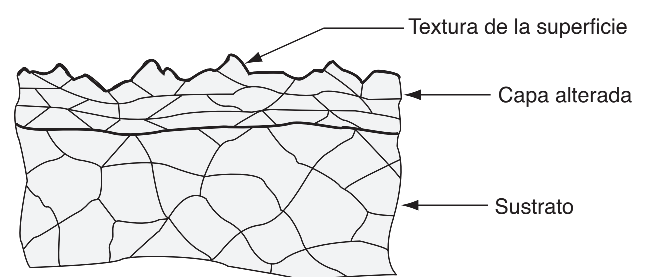


FIGURA 5.2 Sección transversal magnificada de una superficie metálica común.

de la superficie de una pieza metálica, que se presenta en la figura 5.2. Aunque aquí el análisis se concentra en las superficies metálicas, los comentarios vertidos aquí se aplican a las cerámicas y polímeros, con modificaciones debidas a las diferencias en la estructura de estos materiales. El cuerpo de la pieza, conocida como ***sustrato***, tiene una estructura granular que depende del procesamiento previo del metal; por ejemplo, la estructura del sustrato del metal se ve afectada por su composición química, el proceso de fundición que se usó originalmente para el metal, y cualesquiera operaciones de deformación y tratamientos térmicos llevados a cabo sobre el material de fundición.

El exterior de la pieza es una superficie cuya topografía es todo menos recta y tersa. En la sección transversal magnificada, la superficie tiene rugosidad, ondulaciones y defectos. Aunque aquí no se observan, también tiene un patrón o dirección que resulta del proceso mecánico que la produjo. Todos estos rasgos geométricos quedan incluidos en el término ***textura de la superficie***.

Justo por debajo de la superficie se encuentra una capa de metal cuya estructura difiere de la del sustrato. Se denomina ***capa alterada***, y es una manifestación de las acciones que se mencionaron al hablar de la superficie, durante la creación de ésta y etapas posteriores. Los procesos de manufactura involucran energía, por lo general en cantidades importantes, que opera sobre la pieza, contra su superficie. La capa alterada puede resultar del endurecimiento por trabajo (energía mecánica), calor (energía térmica), tratamiento químico, o incluso energía eléctrica. El metal de esta capa resulta afectado por la aplicación de energía, y su microestructura se altera en consecuencia. Esta capa alterada cae dentro del alcance de la ***integridad de la superficie***, que tiene que ver con la definición, la especificación y el control de las capas de la superficie de un material (metales, los más comunes), en la manufactura y el desempeño posterior en el uso. El alcance de la integridad de la superficie por lo general se interpreta para incluir la textura de la superficie, así como la capa alterada ubicada bajo ella.

Además, la mayoría de las superficies metálicas están cubiertas por una ***capa de óxido***, si se da el tiempo suficiente para que se forme después del procesamiento. El aluminio forma en su superficie una capa delgada, densa y dura de Al_2O_3 (que sirve para proteger al sustrato de la corrosión), y el fierro forma óxidos de varias composiciones químicas sobre su superficie (el óxido, que virtualmente no da ninguna protección). También es probable que en la superficie de la pieza haya humedad, mugre, aceite, gases adsorbidos, y otros contaminantes.

5.2.2 Textura de las superficies

La ***textura de la superficie*** consiste en las desviaciones repetitivas o aleatorias de la superficie nominal de un objeto; la definen cuatro características: rugosidad, ondulación, orientación y defectos o fallas, como se observa en la figura 5.3. La ***rugosidad*** se refiere a las desviaciones pequeñas, espaciadas finamente, de la superficie nominal y que están determinadas por las características del material y el proceso que formó la superficie. La ***ondulación*** se define como las desviaciones de espaciamiento mucho mayor; ocurren

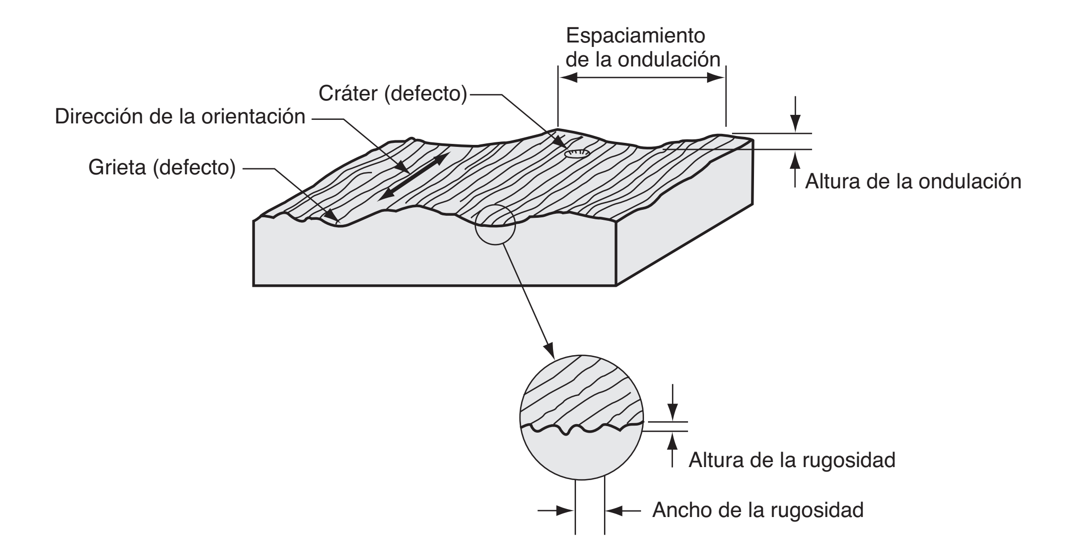


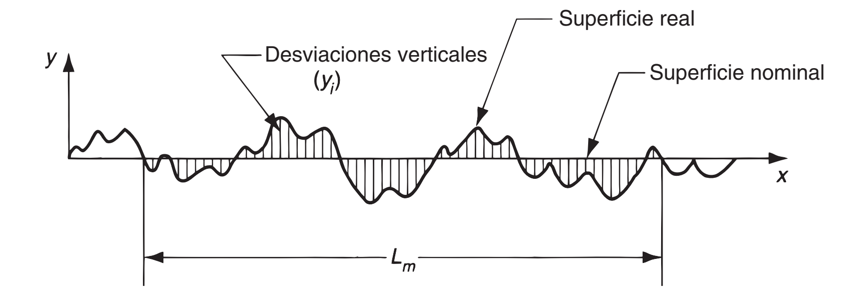
FIGURA 5.3 Rasgos de la textura de una superficie.

debido a la deflexión del trabajo, vibraciones, tratamiento térmicas, y factores similares. La rugosidad está sobreimpuesta a la ondulación. La ***orientación*** es la dirección predominante o patrón de la textura de la superficie. Está determinada por el método de manufactura utilizado para crear a la superficie, por lo general a partir de la acción de una herramienta de corte. En la figura 5.4 se ilustran la mayoría de las orientaciones posibles que puede haber en una superficie, junto con el símbolo que utiliza el diseñador para especificarlas. Por último, los ***defectos*** son irregularidades que ocurren en forma ocasional en la superficie; incluyen grietas, rayaduras, inclusiones y otros defectos similares. Aunque algunos de los defectos se relacionan con la textura de la superficie también afectan su integridad (véase la sección 5.2.3).

FIGURA 5.4 Orientaciones posibles de una superficie (Fuente: [1]).

Símbolo de la orientación	Patrón de la superficie	Descripción
=		La orientación es paralela a las líneas que representan a la superficie a que se aplica el símbolo.
⊥		La orientación es perpendicular a la línea que representa la superficie a que el símbolo se aplica.
X		La orientación es angular en ambas direcciones a la línea que representa la superficie a que se aplica el símbolo.
M		La orientación es multidireccional.
C		La orientación es circular en relación con el centro de la superficie para la que se utiliza el símbolo.
R		La orientación es aproximadamente radial en relación con el centro de la superficie para la que se emplea el símbolo.
P		La orientación es particular, no direccional o protuberante.

FIGURA 5.5 Las desviaciones de la superficie nominal que se usan en las dos definiciones de rugosidad de una superficie.



Rugosidad de la superficie y acabado de la superficie La rugosidad de una superficie es una característica mensurable, con base en las desviaciones de la rugosidad según se definió antes. El ***acabado de la superficie*** es un término más subjetivo que denota la suavidad y calidad general de una superficie. En el habla popular, es frecuente utilizar el acabado superficial o de la superficie como sinónimo de su rugosidad.

La medida que se emplea más comúnmente para la textura de una superficie, es su rugosidad. Respecto a la figura 5.5, la ***rugosidad de la superficie*** se define como el promedio de las desviaciones verticales a partir de la superficie nominal, en una longitud especificada de la superficie. Por lo general se utiliza un promedio aritmético (AA), con base en los valores absolutos de las desviaciones, y este valor de la rugosidad se conoce con el nombre de ***rugosidad promedio***. En forma de ecuación es

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx \tag{5.1}$$

donde R_a = media aritmética de la rugosidad, m (in); y es la desviación vertical a partir de la superficie nominal (convertida a valor absoluto), m (in); y L_m es la distancia especificada en la que se miden las desviaciones de la superficie. Quizá sea más fácil de entender una aproximación de la ecuación (5.1), dada por

$$R_a = \sum_{i=1}^{n} \frac{|y_i|}{n} \tag{5.2}$$

donde R_a tiene el mismo significado que antes; y_i son las desviaciones verticales convertidas a valor absoluto e identificadas por el subíndice i, m (in) y n es el número de desviaciones incluidas en L_m. Se ha dicho que las unidades en estas ecuaciones son m (in). En realidad, la escala de las desviaciones es muy pequeña, por lo que las unidades más apropiadas son μm (μm = m × 10^{-6} = mm × 10^{-3}) o μ-in (μ-in = in × 10^{-6}). Éstas son las unidades de uso más común para expresar la rugosidad de una superficie.

Hoy día, el AA es el método de promedios que se emplea más para expresar la rugosidad de una superficie. Una alternativa, que en ocasiones se utiliza en Estados Unidos, es el promedio según la ***raíz media cuadrática*** (RMS), que es la raíz cuadrada de la media de las desviaciones elevadas al cuadrado sobre la longitud de medición. Los valores RMS de la rugosidad de la superficie casi siempre serán mayores que los AA, debido a que las desviaciones grandes pesan más en los cálculos del valor RMS.

La rugosidad de la superficie tiene la misma clase de deficiencias que cualquier medida que se use para evaluar un atributo físico complejo. Por ejemplo, falla para tomar en cuenta las orientaciones del patrón superficial; así, la rugosidad de la superficie varía en forma significativa, en función de la dirección en que se mida.

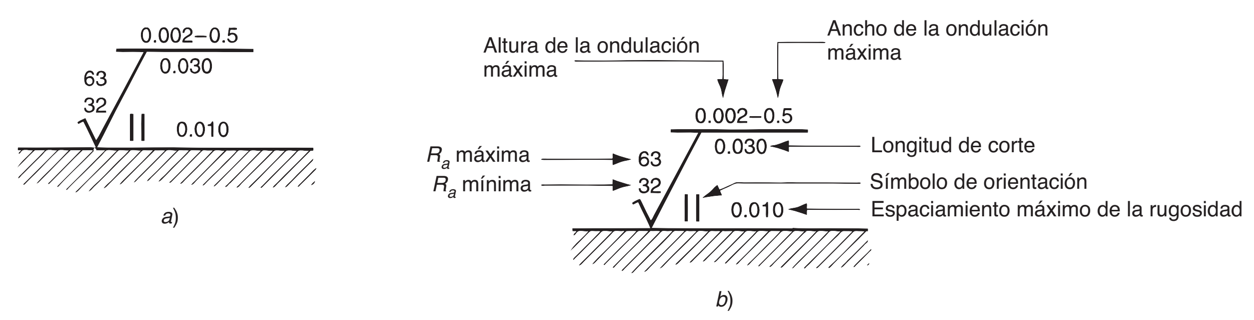


FIGURA 5.6 Símbolos para la textura de la superficie en los planos de ingeniería: *a*) el símbolo, y *b*) símbolo con leyendas de identificación. Los valores de R_a están dados en micropulgadas; las unidades para otras mediciones se dan en pulgadas. Los diseñadores no siempre especifican todos los parámetros en los planos de ingeniería.

Otra deficiencia es que la ondulación queda incluida en el cálculo de R_a. Para evitar este problema se emplea un parámetro denominado ***longitud de corte***, que se usa como un filtro que separa la ondulación de una superficie medida de las desviaciones de la rugosidad. En realidad, la longitud de corte es una distancia muestral a lo largo de la superficie. Una distancia muestral más corta que el ancho de la ondulación eliminará las desviaciones verticales asociadas con ésta y sólo incluirá aquellas que se relacionan con la rugosidad. En la práctica, la longitud de corte más común es 0.8 mm (0.030 in). La longitud de medición L_m se establece normalmente como de cinco veces la longitud de corte.

Las limitaciones de la rugosidad de la superficie han motivado la creación de medidas adicionales que describan en forma más completa la topografía de una superficie dada. Estas mediciones incluyen salidas gráficas tridimensionales de la superficie, como se describe en la referencia [12].

Símbolos para la textura de la superficie Los diseñadores especifican la textura de la superficie en un plano de ingeniería, por medio de símbolos como los que se ven en la figura 5.6. El símbolo que designa los parámetros de la textura de una superficie es una marca de revisión (se parece al símbolo de la raíz cuadrada), con acotaciones para la rugosidad promedio, ondulación, corte, orientaciones y espaciamiento máximo de la rugosidad. Los símbolos para las orientaciones están tomados de la figura 5.4.

5.2.3 Integridad de la superficie

La textura de la superficie por sí sola no describe por completo una superficie. En el material puede haber cambios metalúrgicos o de otra clase inmediatamente debajo de la superficie, que pueden tener un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas. La ***integridad de la superficie*** es el estudio y control de esta capa subsuperficial y cualesquiera cambios debido al procesamiento que influyan en el desempeño de la pieza o producto terminado. Ya antes se hizo referencia a esta capa subsuperficial como la capa alterada cuando su estructura difiere de la del sustrato, como se ilustra en la figura 5.2.

En la tabla 5.2 se enlistan las alteraciones y daños posibles que puede recibir la capa subsuperficial durante la manufactura. Los cambios superficiales son ocasionados por la aplicación de distintas formas de energía durante el procesamiento: mecánica, térmica, química y eléctrica. La energía mecánica es la más común que se utiliza en la manufactura; se aplica contra el material de trabajo en operaciones tales como la de dar forma a un metal (por ejemplo, forjado, extrusión), prensado y maquinado. Aunque la función primaria en esos procesos consiste en cambiar la geometría de la pieza que se trabaja, la energía mecánica también ocasiona esfuerzos residuales, endurecimiento por trabajo y grietas en las capas de la superficie. En la tabla 5.3 se indican los tipos

TABLA 5.2 Alteraciones superficiales y subsuperficiales que definen la integridad de una superficie.[a]

Absorción Impurezas absorbidas y retenidas por las capas de la superficie de la base del material, que es posible que generen fragilidad u otros cambios de propiedades.
Agotamiento de la aleación Ocurre cuando elementos críticos de la aleación se pierden de las capas superficiales, con la posible pérdida de propiedades del metal.
Grietas Rupturas o separaciones estrechas en la superficie o debajo de ésta, que alteran la continuidad del material. Las grietas se caracterizan por tener aristas afiladas y razones de longitud a ancho de 4:1 o más. Se clasifican en macroscópicas (son observables con una ampliación de 10X o menos) y microscópicas (requieren magnificación de más de 10X).
Cráteres Depresiones rugosas de la superficie ocasionadas por descargas de cortocircuitos asociadas con métodos eléctricos de procesamiento, tales como el maquinado por descargas eléctricas y electroquímicos (véase el capítulo 26).
Cambios en la dureza Se refieren a diferencias de dureza en la superficie o cerca de ella.
Zona afectada por el calor Regiones del metal afectadas por la aplicación de energía térmica; las regiones no se funden pero se calientan lo suficiente como para que se induzcan cambios metalúrgicos que afectan sus propiedades. Abreviado como HAZ, el efecto es más destacado en operaciones de soldadura por fusión (capítulo 31).
Inclusiones Partículas pequeñas de material incorporadas a las capas de la superficie durante el procesamiento; forman una discontinuidad en el material base. Su composición difiere en general de aquella del material base.
Ataque intergranular Varias formas de reacción química en la superficie, incluyendo la corrosión y oxidación intergranular.
Traslapes, pliegues y costuras Irregularidades y defectos en la superficie ocasionados por el comportamiento plástico de superficies que se traslapan.
Picaduras Depresiones poco profundas con aristas redondeadas formadas por varios mecanismos, incluyendo grabados selectivos o corrosión; remoción de inclusiones superficiales; abolladuras formadas mecánicamente, o acción electroquímica.
Deformación plástica Cambios microestructurales a partir de deformaciones en la superficie de los metales; es resultado del endurecimiento por deformación.
Recristalización Formación de granos nuevos en metales endurecidos por deformación; se asocia con el calentamiento de las piezas metálicas que se hayan deformado.
Metal redepositado Metal removido de la superficie en estado líquido y vuelto a depositar antes de solidificarse.
Metal resolidificado Porción de la superficie que se funde durante el procesamiento y después vuelve a solidificar sin abandonar la superficie. También se utiliza el término metal vuelto a fundir para él. El término metal de refundición incluye tanto al redepositado como al resolidificado.
Esfuerzos residuales Esfuerzos que permanecen en el material después de su procesamiento.
Grabado selectivo Forma de ataque químico que se concentra en ciertos componentes del material base.

[a] Compilado de la referencia [2]

TABLA 5.3 Formas de energía que se aplican en la manufactura y alteraciones posibles que pueden ocurrir en la superficie y bajo ella.[a]

Forma de energía	Mecánica	Térmica	Química	Eléctrica
Daño	Esfuerzos residuales en la capa subsuperficial Grietas – microscópicas y macroscópicas Deformación plástica Traslapes, pliegues o costuras Huecos o inclusiones Variaciones en la dureza (por ejemplo, endurecimiento por trabajo)	Cambios metalúrgicos (recristalización, cambios en el tamaño de los granos, cambios de fase en la superficie) Material redepositado o resolidificado Zona afectada por el calor Cambios de dureza	Ataque intergranular Contaminación química Absorción de elementos tales como H y Cl Corrosión, picaduras y grabados Disolución de constituyentes microscópicos Abatimiento de la aleación	Cambios en la conductividad o el magnetismo Cráteres que resultan de cortocircuitos durante la aplicación de ciertas técnicas eléctricas de procesamiento

[a] Basado en la referencia [2].

distintos de alteraciones superficiales y subsuperficiales atribuibles a las formas diferentes de energía que se aplican durante la manufactura. La mayor parte de alteraciones descritas en la tabla se refieren a los metales, para los que se ha estudiado mucho la integridad de su superficie.

5.3 EFECTO DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

La capacidad de lograr cierta tolerancia o superficie es una función del proceso de manufactura. En esta sección se describen las capacidades generales de distintos procesos en términos de la tolerancia, la rugosidad e integridad de la superficie.

5.3.1 Tolerancias y procesos de manufactura

Ciertos procesos de manufactura son inherentemente más exactos que otros. La mayoría de procesos de maquinado son muy exactos, capaces de alcanzar tolerancias de ±0.05 mm (±0.002 in) o mejores. Por el contrario, las fundiciones con arena por lo general son inexactas y deben especificarse tolerancias de 10 a 20 veces las que se utilizan para piezas maquinadas. En la tabla 5.4 se enlista una variedad de procesos de manufactura y se indican las tolerancias comunes para cada proceso. Las tolerancias se basan en la capacidad de los procesos para la operación particular de manufactura, como se define en la sección 44.2. La tolerancia que debe especificarse es función del tamaño de la pieza; entre más grandes sean las piezas, requieren tolerancias más generosas. En la tabla se enlistan tolerancias para piezas de tamaño moderado en cada categoría de procesamiento.

5.3.2 Superficies y procesos de manufactura

El proceso de manufactura determina el acabado de la superficie y la integridad de ésta. Algunos procesos son inherentemente más capaces que otros de producir superficies mejores. En general, el costo del procesamiento se incrementa con la mejora del acabado de la superficie. Esto se debe a que para obtener superficies cada vez mejores por lo general se requieren operaciones adicionales y más tiempo. Los procesos específicos para proveer

TABLA 5.4 Límites comunes de la tolerancia, con base en la capacidad de varios de estos procesos de manufactura (véase la sección 44.2).

	Límites comunes de la tolerancia			Límites comunes de la tolerancia	
Proceso	mm	pulgadas	Proceso	mm	pulgadas
Fundición con arena			Procesos abrasivos:		
Hierro colado	±1.3	±0.050	Esmerilado	±0.008	±0.0003
Acero	±1.5	±0.060	Rectificado	±0.005	±0.0002
Aluminio	±0.5	±0.020	Bruñido	±0.005	±0.0002
Fundición con molde	±0.12	±0.005	Procesos no tradicionales:		
Moldeo de plásticos			Maquinado químico	±0.08	±0.003
Polietileno	±0.3	±0.010	Descarga eléctrica	±0.025	±0.001
Poliestireno	±0.15	±0.006	Rectificado electroquímico	±0.025	±0.001
Maquinado:			Maquinado electroquímico	±0.05	±0.002
Barrenado, diámetro:			Corte con haz de electrones	±0.08	±0.003
6 mm (0.250 in)	+0.08, −0.03	+0.003, −0.001	Corte con haz de láser	±0.08	±0.003
25 mm (1.000 in)	+0.13, −0.05	+0.006, −0.002	Corte con arco de plasma	±1.3	±0.050
Fresado	±0.08	±0.003			
Torneado	±0.05	±0.002			

Compilado de las fuentes [4], [5] y otras.

TABLA 5.5 Valores de rugosidad superficial producidos por distintos procesos de manufactura.[a]

Proceso	Acabado de superficie común	Rango de rugosidad[b]	Proceso	Acabado de superficie común	Rango de rugosidad[b]
Fundición:			Abrasivos:		
Fundición con molde	Bueno	1–2 (30–65)	Esmerilado	Muy bueno	0.1–2 (5–75)
Fundición con revestimiento	Bueno	1.5–3 (50–100)	Rectificado	Muy bueno	0.1–1 (4–30)
Fundición con arena	Malo	12–25 (500–1000)	Bruñido	Excelente	0.05–0.5 (2–15)
Formado de metales:			Pulido	Excelente	0.1–0.5 (5–15)
Laminado en frío	Bueno	1–3 (25–125)	Superacabado	Excelente	0.02–0.3 (1–10)
Corte de lámina metálica	Bueno	1–3 (25–125)	No tradicionales:		
Extrusión en frío	Bueno	1–4 (30–150)	Fresado químico	Medio	1.5–5 (50–200)
Laminado en caliente	Malo	12–25 (500–1000)	Electroquímico	Bueno	0.2–2 (10–100)
Maquinado:			Descarga eléctrica	Medio	1.5–15 (50–500)
Perforado	Bueno	0.5–6 (15–250)	Haz de electrones	Medio	1.5–15 (50–500)
Barrenar	Medio	1.5–6 (60–250)	Haz de láser	Medio	1.5–15 (50–500)
Fresar	Bueno	1–6 (30–250)	Térmico:		
Planeado	Medio	1.5–12 (60–500)	Soldadura por arco	Malo	5–25 (250–1000)
Escariar	Bueno	1–3 (30–125)	Corte con llama	Malo	12–25 (500–1000)
Perfilar	Medio	1.5–12 (60–500)	Corte con arco de plasma	Malo	12–25 (500–1000)
Aserrar	Malo	3–25 (100–1000)			
Tornear	Bueno	0.5–6 (15–250)			

[a] Compilada a partir de las referencias [1] y [2] y otras.

[b] Descripción subjetiva, y el rango común de los valores de rugosidad superficial están dados en μm (μ-in). La rugosidad varía de manera significativa para un proceso dado en función de los parámetros del proceso.

acabados superiores incluyen el bruñido, el rectificado, el pulido y el superacabado (véase el capítulo 26). En la tabla 5.5 se indica la rugosidad superficial usual que se espera de varios procesos de manufactura.

REFERENCIAS

[1] American National Standards Institute, Inc. ***Surface Texture***, ANSI B46.1-1978. American Society of Mechanical Engineers, Nueva York, 1978.

[2] American National Standards Institute, Inc. ***Surface Integrity***, ANSI B211.1-1986. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1986.

[3] American National Standards Institute, Inc. ***Dimensioning and Tolerancing***, ANSI Y14.5M-1982. American Society of Mechanical Engineers, Nueva York, 1982.

[4] Bakerjian, R. y Mitchell, P. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. VI, ***Design for Manufacturability***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1992.

[5] Drozda, T. J. y Wick, C. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. I, ***Machining***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1983.

[6] ***Machining Data Handbook***, 3a. ed., Vol. II. Machinability Data Center, Cincinnati, Ohio, 1980, Ch. 18.

[7] Mummery, L. ***Surface Texture Analysis—The Handbook***. Hommelwerke Gmbh, Germany, 1990.

[8] Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L. y Ryffel, H., ***Machinery's Handbook***, 26a. ed. Industrial Press Inc., Nueva York, 2000.

[9] Schaffer, G. H. "The Many Faces of Surface Texture." Special Report 801, ***American Machinist and Automated Manufacturing***, junio de 1988, pp. 61-68.

[10] Sheffield Measurement, a Cross & Trecker Company, ***Surface Texture and Roundness Measurement Handbook***, Dayton, Ohio, 1991.

[11] Wick, C. y Veilleux, R. F. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. IV, ***Quality Control and Assembly***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1987, sección 1.

[12] Zecchino, M. "Why Average Roughness Is Not Enough", ***Advanced Materials & Process***, marzo de 2003, pp. 25-28.

PREGUNTAS DE REPASO

5.1. ¿Qué es tolerancia?
5.2. ¿Cuáles son algunas de las razones por las que son importantes las superficies?
5.3. Defina superficie nominal.
5.4. Defina la textura de una superficie.
5.5. ¿En qué se diferencia la textura de una superficie de la integridad de ésta?
5.6. En el ámbito de la textura de la superficie, ¿cómo se distingue la rugosidad de la ondulación?
5.7. La rugosidad de una superficie es un aspecto mensurable de su textura; ¿qué significa ***rugosidad de la superficie***?
5.8. ¿Cuál es la diferencia entre las mediciones AA y RMS, de la rugosidad de una superficie?
5.9. Indique algunas de las limitaciones del empleo de la rugosidad de la superficie como medida de la textura de ésta.
5.10. Identifique algunos cambios y daños que ocurren en la superficie de un metal o inmediatamente debajo de ella.
5.11. ¿Qué es lo que ocasiona los distintos tipos de cambio que ocurren en una capa alterada, justo debajo de la superficie?
5.12. Mencione algunos procesos de la manufactura que produzcan acabados de la superficie muy deficientes.
5.13. Cite algunos procesos de manufactura que produzcan acabados de la superficie muy buenos o excelentes.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 13 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

5.1. ¿Cuál de las siguientes es una tolerancia?: *a*) claro entre una flecha y la cavidad que lo aloja, *b*) error de medición, *c*) variación total permisible de una dimensión específica, o *d*) variación en la manufactura.
5.2. ¿Cuáles de los siguientes son los dos términos geométricos que tienen el mismo significado?: *a*) circularidad, *b*) concentricidad, *c*) cilindricidad, y *d*) redondez.
5.3. ¿La textura de una superficie incluye a cuáles de las siguientes características? (tres respuestas correctas): *a*) desviaciones de la superficie nominal, *b*) marcas de avance de la herramienta que produjo la superficie, *c*) variaciones en la dureza, *d*) películas de aceite, y *e*) grietas superficiales.
5.4. ¿Cuál método basado en promediar produce por lo general el valor más elevado de la rugosidad de una superficie?: *a*) AA, o *b*) RMS.
5.5. ¿La textura de una superficie está incluida en el ámbito de la integridad de ella: *a*) verdadero, o *b*) falso?
5.6. ¿La energía térmica normalmente se asocia con cuáles de los siguientes cambios en la capa alterada? (tres respuestas correctas): *a*) grietas, *b*) variaciones en la dureza, *c*) zona afectada por el calor, *d*) deformación plástica, *e*) recristalización, y *f*) huecos.
5.7. ¿Cuáles de los siguientes procesos de manufactura es probable que produzcan el mejor acabado de la superficie?: *a*) soldadura autógena con arco, *b*) esmerilar, *c*) maquinado, *d*) fundición con arena, o *e*) aserrar.
5.8. ¿Cuáles de los procesos de manufactura siguientes es probable que den como resultado el peor acabado de la superficie?: *a*) rolado en frío, *b*) esmerilar, *c*) maquinado, *d*) fundición con arena, o *e*) aserrar.

Parte II
Materiales de la ingeniería

6 METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En la parte II se estudian los cuatro tipos de materiales de la ingeniería: 1) metales, 2) cerámicos, 3) polímeros, y 4) compuestos. Los metales son los materiales más importantes de la ingeniería y el tema de este capítulo. Un metal es una categoría de materiales que se caracterizan generalmente por tener propiedades de ductilidad, maleabilidad, lustre y conductividad eléctrica y térmica elevadas. La categoría incluye tanto a elementos metálicos como a sus aleaciones. Los metales tienen propiedades que satisfacen una variedad amplia de requerimientos de diseño. Los procesos de manufactura con los que se les transforma en productos, han sido creados y mejorados a lo largo de muchos años; en realidad, algunos de los procesos datan de tiempos ancestrales (véase la nota histórica 1.2). La importancia tecnológica y comercial de los metales se debe a las propiedades generales siguientes, que poseen virtualmente todos los metales comunes:

- ➢ ***Rigidez y resistencia elevadas***. Los metales pueden alearse para darles rigidez, resistencia y dureza elevadas; se les utiliza para que proporcionen el marco estructural para la mayor parte de productos de la ingeniería.
- ➢ ***Tenacidad***. Los metales tienen la capacidad de absorber energía mejor que otras clases de materiales.
- ➢ ***Conductividad eléctrica buena***. Los metales son conductores debido a su enlace metálico, que permite el movimiento libre de los electrones como transportadores de carga.
- ➢ ***Conductividad térmica buena***. Los enlaces metálicos también explican el porqué los metales generalmente conducen el calor mejor que los cerámicos y los polímeros.

Además, ciertos metales tienen propiedades específicas que los hace atractivos para aplicaciones especializadas. Muchos metales comunes se hallan disponibles a un costo relativamente bajo por peso unitario, y sólo por esta razón con frecuencia son el material seleccionado.

Los metales se convierten en piezas y productos que conllevan una variedad de procesos de manufactura. La forma inicial de los metales difiere, lo que depende del proceso. Las categorías principales son: 1) ***metal fundido***, en la que la forma inicial es una pieza fundida; 2) ***metal forjado***, en la que el metal ha sido trabajado o puede serlo (por ejemplo, rolado u otro modo de darle forma) después de la fundición; en general, en comparación con los fundidos, a los metales forjados se les asocian propiedades mecánicas mejores; y 3) ***metal pulverizado***, en la que el metal es adquirido en forma de polvos muy finos para convertirlo en piezas por medio de técnicas metalúrgicas especiales para ello. La mayor parte de los metales se encuentra disponible en las tres formas. En este capítulo, el estudio se centrará en las categorías 1) y 2), que son las de mayor interés comercial y para la ingeniería. En el capítulo 16 se examinan las técnicas metalúrgicas para polvos.

Los metales se clasifican en dos grupos principales: 1) ***ferrosos***, los que se basan en el hierro, y 2) ***no ferrosos***, todos los demás. El grupo de los ferrosos puede subdividirse en aceros y tipos de hierro colado. La mayor parte de este capítulo estará organizado alrededor de esta clasificación, pero primero se verá el tema general de las aleaciones y los diagramas de fase.

6.1 ALEACIONES Y DIAGRAMAS DE FASE

Aunque ciertos metales son importantes como metales puros (por ejemplo, oro, plata, cobre), la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería requiere de las propiedades mejoradas que se obtienen con la aleación. Con ésta es posible mejorar la resistencia, dureza y otras propiedades, en comparación con las de los metales puros. En esta sección, se definen y clasifican las aleaciones; después se estudian los diagramas de fase, que indican las fases de un sistema de aleación como función de la composición y la temperatura.

6.1.1 Aleaciones

Una ***aleación*** es un metal compuesto de dos o más elementos, al menos uno de los cuales es metálico. Las dos categorías principales de aleaciones son 1) soluciones sólidas, y 2) fases intermedias.

Soluciones sólidas Una ***solución sólida*** es una aleación en la que un elemento se disuelve en otro para formar una estructura de fase única. El término ***fase*** describe una masa homogénea de material, como la de un metal en el que todos los granos tienen la misma estructura reticular cristalina. En una solución sólida, el solvente o elemento base es metálico, y el elemento disuelto puede ser metálico o no metálico. Las soluciones sólidas

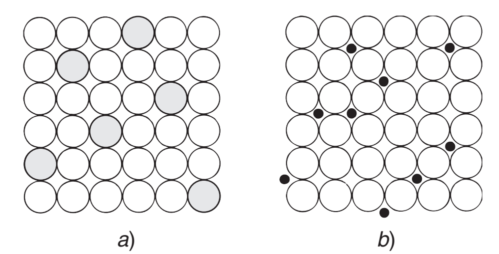


FIGURA 6.1 Dos formas de soluciones sólidas: *a*) solución sólida sustitucional, y *b*) solución sólida intersticial.

vienen en dos formas, que se ilustran en la figura 6.1. La primera es una ***solución sólida sustitucional***, en la que los átomos del elemento solvente son remplazados en su celda unitaria por el elemento disuelto. El latón es un ejemplo de esto, en el que el zinc está disuelto en cobre. Para hacer la sustitución deben satisfacerse muchas reglas ([2], [5], [6]): 1) el radio atómico de los dos elementos debe ser similar, por lo general dentro de un 15%; 2) sus tipos de retículas deben ser las mismas; 3) si los elementos tienen valencias diferentes, es más probable que el metal de valencia menor sea el solvente; y 4) si los elementos tienen afinidad química elevada uno por el otro, es menos probable que formen una solución sólida y más que constituyan un compuesto.

El segundo tipo de solución sólida es la ***solución sólida intersticial***, en la que los átomos del elemento solvente se acomodan en los espacios vacíos entre los átomos del metal base, en la estructura reticular. Se desprende que los átomos que quedan en esos intersticios deben ser pequeños en comparación con los del metal solvente. El ejemplo más importante de este segundo tipo de aleación es el carbono disuelto en hierro para formar acero.

En ambas formas de la solución sólida, por lo general la estructura aleada es más fuerte y dura que cualesquiera de los elementos que la componen.

Fases intermedias Por lo general hay límites a la solubilidad de un elemento en otro. Cuando la cantidad del elemento solvente en la aleación excede el límite de solubilidad sólida del metal base, en la aleación se forma una segunda fase. Para describirla se emplea el término ***fase intermedia*** debido a que su composición química es intermedia entre los dos elementos puros. Su estructura cristalina también es diferente de aquella de los metales puros. En función de la composición, y con el reconocimiento de que muchas aleaciones consisten en más de dos elementos, dichas fases intermedias pueden ser de varios tipos, incluyendo 1) compuestos metálicos que consisten en un metal y un no metal, como el Fe_3C; y 2) compuestos intermetálicos, dos metales que forman un compuesto, como el Mg_2Pb. Es frecuente que la composición de la aleación sea tal que la fase intermedia se mezcle con la solución sólida primaria para formar una estructura de dos fases, una dispersa en la segunda. Estas aleaciones de dos fases son importantes porque pueden formularse y ser tratadas térmicamente para darles una resistencia significativamente más elevada que la de las soluciones sólidas.

6.1.2 Diagramas de fase

Como se utiliza en este texto, el término ***diagrama de fase*** es un medio gráfico de representar las fases de un sistema de aleación metálica como una función de la composición y la temperatura. El análisis del diagrama se limitará a sistemas de aleaciones que consisten en dos elementos a presiones atmosféricas. Este tipo de diagrama se denomina ***diagrama de fase binaria***. En otros textos sobre la ciencia de los materiales se estudian otras formas de los diagramas de fase, por ejemplo en la referencia [5].

El sistema de aleación cobre-níquel El modo mejor de presentar el diagrama de fase es con un ejemplo. En la figura 6.2 se ilustra uno de los casos más sencillos, el sistema de la aleación Cu-Ni. En el eje horizontal se grafica la composición, y en el vertical la

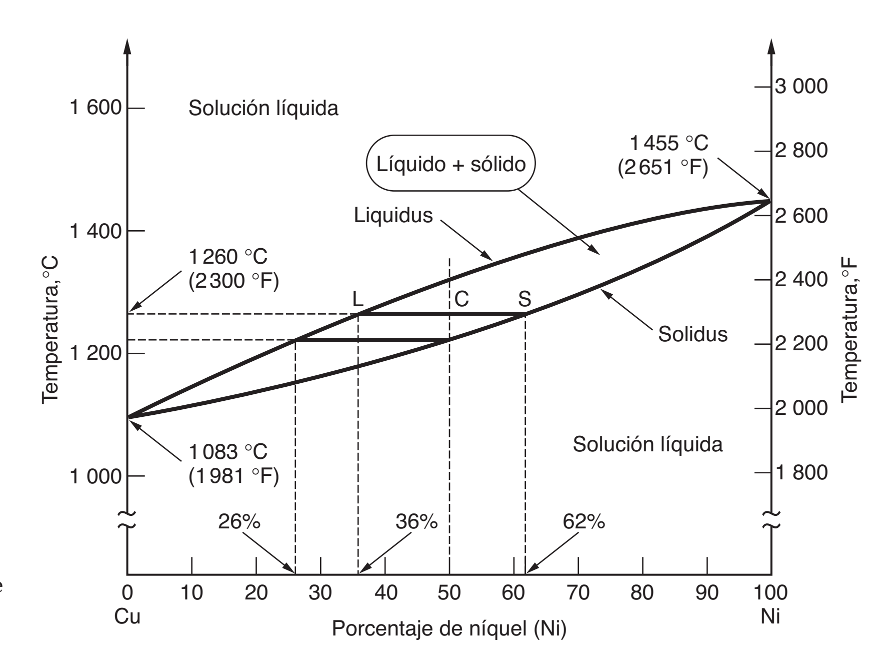


FIGURA 6.2 Diagrama de fase para el sistema de la aleación cobre-níquel.

temperatura. Así, cualquier punto del diagrama indica la composición conjunta y la fase o fases presentes a la temperatura dada. El cobre puro se funde a 1 083 ºC (1 981 ºF), y el níquel puro a 1 455 ºC (2 651 ºF). Las composiciones de la aleación entre estos extremos muestran fusión gradual que comienza en el solidus y en el liquidus conforme la temperatura se incrementa.

El sistema cobre-níquel es una aleación de solución sólida a través de todo el rango de composiciones. En cualquier punto de la región por debajo de la línea de solidus, la aleación es una solución sólida; en este sistema no hay fases sólidas intermedias. Sin embargo, hay una mezcla de fases en la región delimitada por las líneas de solidus y de liquidus. Recuerde el lector que en el capítulo 4 se dijo que el solidus es la temperatura a la que el metal sólido comienza a fundirse conforme la temperatura aumenta, y el liquidus es la temperatura en que termina la fusión. Ahora se ve en el diagrama de fase que esas temperaturas varían con la composición. Entre el solidus y el liquidus, el metal es una mezcla sólida-líquida.

Determinación de las composiciones químicas de las fases Aunque la composición conjunta de la aleación está dada por su posición en el eje *x*, las composiciones de las fases líquida y sólida no son las mismas. Es posible determinar dichas composiciones por medio del diagrama de fase si se dibuja una línea horizontal a partir de la temperatura de interés. Los puntos de la intersección de la línea horizontal con las de solidus y de liquidus indican las composiciones de las fases sólida y líquida presentes, respectivamente. Tan sólo se hacen las proyecciones verticales desde esos puntos de intersección hacia el eje *x* y se leen las composiciones correspondientes.

Ejemplo 6.1 Determinación de composiciones a partir del diagrama de fase

Para ilustrar el procedimiento, suponga que se desea analizar las composiciones de las fases líquida y sólida presentes en el sistema cobre-níquel, para una composición agregada de 50% de níquel y a una temperatura de 1 260 ºC (2 300 ºF).

Solución: Se dibuja una línea horizontal a la temperatura dada, como se muestra en la figura 6.2. La línea interseca la de solidus en una composición de 62% de níquel, lo que indica la composición de la fase sólida. La intersección con la línea de liquidus ocurre en una composición de 36% de Ni, que corresponde al análisis de la fase líquida.

Conforme se reduce la temperatura de la aleación 50-50 de Cu-Ni, se alcanza la línea de solidus alrededor de 1 221 °C (2 230 °F). Si se aplica el mismo procedimiento que se utilizó en el ejemplo, se encuentra que la composición del metal sólido es de 50% de níquel, y la composición del último remanente líquido que queda por solidificarse tiene alrededor de 26% de níquel. ¿Cómo puede ser, se preguntará el lector, que la última onza de metal fundido tenga una composición tan diferente de la del metal sólido al que se integra? La respuesta es que el diagrama de fase supone que se permite que prevalezcan condiciones de equilibrio. En realidad, al diagrama de fase binaria a veces se le llama diagrama de equilibrio, debido a dicha suposición. Lo que significa es que se da el tiempo suficiente para que el metal sólido cambie en forma gradual su composición por difusión, para alcanzar la composición indicada por el punto de intersección a lo largo de la línea de liquidus. En la práctica, cuando una aleación se solidifica (por ejemplo, en una fundición), en la masa sólida ocurre una ***segregación*** debido a condiciones de no equilibrio. El primer líquido que se solidifica tiene una composición rica en el elemento metálico con el punto de fusión más alto. Después, conforme más metal se solidifica, su composición es diferente de la del primero que se solidificó. A medida que en una masa sólida aumentan los puntos de formación de núcleos, las composiciones se distribuyen dentro de la masa, en función de la temperatura y el tiempo del proceso en que ocurrió la solidificación. La composición conjunta es el promedio de la distribución.

Determinación de las cantidades de cada fase A partir del diagrama de fase, también se puede determinar las cantidades de cada fase presentes a una temperatura dada. Esto se hace por medio de la ***regla de la palanca inversa***: 1) sobre la misma línea horizontal de antes, que indica la composición conjunta a una temperatura dada, se mide la distancia entre la composición agregada y los puntos de intersección con las líneas de liquidus y de solidus, y se identifican las distancias como CL y CS, respectivamente (véase de nuevo la figura 6.2), 2) la proporción de fase líquida presente está dada por

$$L \text{ Proporción por fase} = \frac{CS}{(CS + CL)} \tag{6.1}$$

3) la proporción de fase sólida presente está dada por

$$S \text{ Proporción por fase} = \frac{CL}{(CS + CL)} \tag{6.2}$$

Ejemplo 6.2 Determinación de las proporciones de cada fase

Determine las proporciones de fases líquida y sólida para la composición de 50% de níquel del sistema cobre-níquel a la temperatura de 1 260 °C (2 300 °F).

Solución: Con la misma línea horizontal de la figura 6.2 para el ejemplo anterior, se miden las distancias CS y CL y resultan ser de 10 mm y 12 mm, respectivamente. Así, la proporción de la fase líquida es de 10/22 = 0.45 (45%) y la proporción de la fase sólida es de 12/22 = 0.55 (55%).

Las proporciones dadas por las ecuaciones (6.1) y (6.2) están dadas en peso, igual que los porcentajes del diagrama de fase. Observe que las proporciones se basan en la distancia al lado opuesto de la fase de interés; de ahí el nombre de regla de la palanca inversa. Puede verse la lógica de esto si se toma el caso extremo cuando, por ejemplo, CS = 0; en ese punto, la proporción de la fase líquida es cero porque se ha alcanzado la línea de solidus y por ello la aleación está por completo solidificada.

Los métodos para determinar las composiciones químicas de las fases y las cantidades en cada una de éstas se aplican tanto a la región sólida del diagrama de fase como a la región liquidus-solidus. Estos métodos pueden emplearse donde sea que haya regiones en el diagrama de fase en que haya dos de ellas presentes. Cuando sólo está presente una

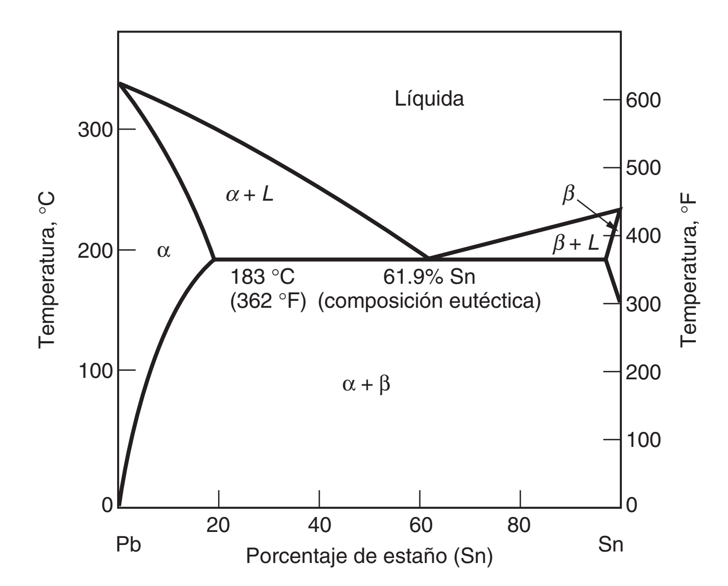


FIGURA 6.3 Diagrama de fase para el sistema de aleación estaño-plomo.

fase (véase la figura 6.2, se trata de toda la región sólida) la composición de la fase es su composición agregada en condiciones de equilibrio; y la regla de la palanca inversa no se aplica puesto que sólo hay una fase.

El sistema de la aleación estaño-plomo Un diagrama de fase más complicado es el del sistema Sn-Pb, que se muestra en la figura 6.3. Las aleaciones estaño-plomo se utilizan mucho como material de soldadura (véase la sección 32.2) de conexiones eléctricas. El diagrama de fase presenta varias características que no aparecen en el de Cu-Ni ya visto. Una característica es la presencia de dos fases sólidas, alfa (α) y beta (β). La fase α es una solución sólida de estaño en plomo en el lado izquierdo del diagrama, y la fase β es una solución sólida de plomo en estaño, que ocurre sólo a temperaturas elevadas alrededor de 200 ºC (375 ºF) en el lado derecho del diagrama. Entre esas soluciones sólidas queda una mezcla de las dos fases sólidas, $\alpha + \beta$.

Otra característica de interés en el sistema estaño-plomo es la manera en que difiere la fusión para composiciones diferentes. El estaño puro se funde a 232 ºC (449 ºF), y el plomo puro a 327 ºC (621 ºF). Las aleaciones de estos elementos se funden a temperaturas más bajas. El diagrama muestra dos líneas de liquidus que comienzan en los puntos de fusión de los metales puros hasta alcanzar una composición de 61.9% de estaño. Ésta es la composición eutéctica para el sistema estaño-plomo. En general, una ***aleación eutéctica*** es una composición particular en un sistema de aleación para la que el solidus y liquidus están a la misma temperatura. La ***temperatura eutéctica*** correspondiente, el punto de fusión de la composición eutéctica, es de 183 ºC (362 ºF), en este caso. La temperatura eutéctica siempre es el punto de fusión más bajo para un sistema de aleación (el término ***eutéctico*** se deriva de la palabra griega eutektos, que significa que se funde con facilidad).

Los métodos para determinar el análisis químico de las fases y las proporciones de éstas presentes, se aplican con facilidad al sistema Sn-Pb igual que se hizo en el de Cu-Ni. En realidad, esos métodos son aplicables en cualquier región que contenga dos fases, inclusive sólidas. La mayoría de los sistemas de aleación se caracteriza por la existencia de fases sólidas y composiciones eutécticas múltiples, por lo que es frecuente que los diagramas de fase de ellos sean similares al del estaño-plomo. Por supuesto, muchos sistemas de aleación son considerablemente más complejos. Uno de ellos se estudiará más adelante, cuando se vea las aleaciones de hierro y carbono.

6.2 METALES FERROSOS

Los metales ferrosos se basan en el hierro, uno de los metales más antiguamente conocidos por el hombre (véase la nota histórica 6.1). Las propiedades y otros datos relacionados con el hierro se presentan en la tabla 6.1*a*). Los metales ferrosos de importancia en la ingeniería son aleaciones de hierro y carbono. Se dividen en dos grupos principales: acero y hierro fundido. Juntos constituyen aproximadamente el 85% de las toneladas de metal en Estados Unidos [5]. Se comenzará el estudio de los metales ferrosos con el examen del diagrama de fase hierro-carbono.

Nota histórica 6.1 *Hierro y acero*

El hierro se descubrió en algún momento durante la Edad de Bronce. Es probable que se haya encontrado entre las cenizas de las fogatas hechas cerca de depósitos de mineral de hierro. El uso del metal creció hasta que finalmente sobrepasó al bronce en importancia. Por lo general se afirma que la Edad de Hierro data de alrededor de 1200 a.C., aunque se han encontrado artefactos hechos de hierro en la gran pirámide de Gizeh, en Egipto, que data de 2900 a.C. En Israel se han encontrado calderas para fundir hierro que se remontan a 1300 a.C. En la antigua Asiria (norte de Irak) se fabricaban carros, espadas y herramientas de hierro alrededor del año 1000 a.C. Los romanos heredaron el trabajo del hierro de sus provincias, sobre todo de Grecia, y perfeccionaron la tecnología para que alcanzara niveles nuevos, difundiéndola por Europa. Las civilizaciones antiguas aprendieron que el hierro era más duro que el bronce y adoptaba un filo más agudo y fuerte.

Durante la Edad Media, en Europa, la invención del cañón creó la primera demanda real de hierro; sólo entonces superó por fin en uso al cobre y bronce. Asimismo, la estufa de hierro fundido, aparato de los siglos XVII y XVIII, incrementó de manera significativa la demanda de hierro (véase la nota histórica 11.3).

En el siglo XIX, industrias tales como la ferroviaria, naviera, construcción, maquinaria y militar, generaron un crecimiento impresionante de la demanda de hierro y acero en Europa y el Continente Americano. Aunque podían producirse cantidades grandes de ***arrabio*** (crudo) por medio de ***altos hornos***, el proceso subsecuente para producir hierro forjado y acero era lento. La necesidad de mejorar la productividad de estos metales vitales fue la "madre de la invención". En Inglaterra, Henry Bessemer inventó el proceso de soplar aire a través del hierro fundido, lo que condujo al ***convertidor Bessemer*** (patentado en 1856). En Francia, Pierre y Emile Martin construyeron el primer ***horno de hogar abierto***, en 1864. Estos métodos permitieron producir hasta 15 toneladas en un solo lote (colada), incremento sustancial respecto de los métodos anteriores.

En Estados Unidos, la expansión de los ferrocarriles después de la Guerra Civil generó una demanda enorme de acero. En las décadas de 1880 y 1890, se usaron por vez primera cantidades significativas de vigas de acero para la construcción. Los rascacielos se basaron en ellas.

Cuando se dispuso de electricidad en abundancia, hacia finales del siglo XIX, esta fuente de energía se usó para fabricar acero. El primer ***horno eléctrico*** comercial para producir acero funcionó en Francia en 1899. Hacia 1920, se había convertido en el proceso principal para hacer aceros aleados.

Justo antes de iniciar la Segunda Guerra Mundial comenzó el uso de oxígeno puro para fabricar acero en varios países europeos y en Estados Unidos. Después de la guerra, trabajos realizados en Austria culminaron en la creación del ***horno de oxígeno básico*** (BOF). Ésta se volvió la tecnología moderna para producir acero, y alrededor de 1970 sobrepasó al método de hogar abierto. El convertidor Bessemer había sido superado por el método de corazón abierto hacia 1920 y a partir de 1971 dejó de ser un proceso comercial para fabricar acero.

TABLA 6.1 Datos básicos de los elementos metálicos: a) hierro.

Símbolo:	Fe	Mineral principal:	***Hematita*** (Fe_2O_3)
Número atómico:	26	Elementos de aleación:	Carbono; también cromo, manganeso, níquel, molibdeno, vanadio y silicio.
Gravedad específica:	7.87		
Estructura cristalina:	BCC	Aplicaciones comunes:	construcción, maquinaria, automotriz, vías y equipo ferroviario.
Temperatura de fusión:	1 539 °C (2 802 °F)		
Módulo de elasticidad:	209 000 MPa (30 × 10^6 lb/in^2)		

Recopilada a partir de las referencias [5], [9], [10] y de otras fuentes.

6.2.1 El diagrama de fase hierro-carbono

En la figura 6.4 se presenta el diagrama de fase del hierro-carbono. El hierro puro se funde a 1 539 ºC (2 802 ºF). Durante la elevación de la temperatura a partir de la del ambiente, pasa por varias transformaciones de fase sólida, como se aprecia en el diagrama. Al comenzar a temperatura ambiente la fase es alfa (α), también llamada ***ferrita***. A 912 ºC (1 674 ºF), la ferrita se transforma en gama (γ), denominada ***austenita***. Ésta, a su vez, se convierte en delta (δ) a 1 394 ºC (2 541 °F), en la que permanece hasta que se funde. Las tres fases son distintas; la alfa y delta tienen estructuras reticulares BCC (véase la sección 2.3), y entre ellas está la gama con FCC. El video clip sobre tratamiento térmico describe el diagrama de fase hierro-carbono y cómo se utiliza para dar resistencia al acero.

El hierro, como producto comercial, se encuentra disponible con varios niveles de pureza. El ***hierro electrolítico*** es el más puro, con cerca de 99.99%, se usa en investigación y otros propósitos en los que se requiere al metal puro. El ***hierro de lingote*** contiene alrededor de 0.1% de impurezas (inclusive cerca de 0.01% de carbono), y se usa en aplicaciones en las que se necesitan ductilidad o resistencia a la corrosión elevadas. El ***hierro forjado*** contiene un 3% de escoria pero muy poco carbono, y se le da forma con facilidad en operaciones de formado en caliente, como la forja.

Los límites de solubilidad del carbono en el hierro son bajos en la fase de ferrita, sólo cerca de 0.022% a 723 ºC (1 333 ºF). En la de austenita puede disolverse cerca de 2.1% de carbono a una temperatura de 1 130 ºC (2 066 ºF). Esta diferencia de solubilidades entre la alfa y la gama origina oportunidades para dar resistencia por medio de tratamiento térmico, pero eso se deja para más adelante. Aun sin tratamiento térmico, la resistencia del hierro se incrementa en forma notable conforme el contenido de carbono aumenta, y se ingresa a la región en la que el metal toma el nombre de acero. Con más precisión, el ***acero*** se define como una aleación de hierro-carbono que contiene entre 0.02% y 2.1% de carbono; por supuesto, los aceros también pueden contener otros elementos de aleación.

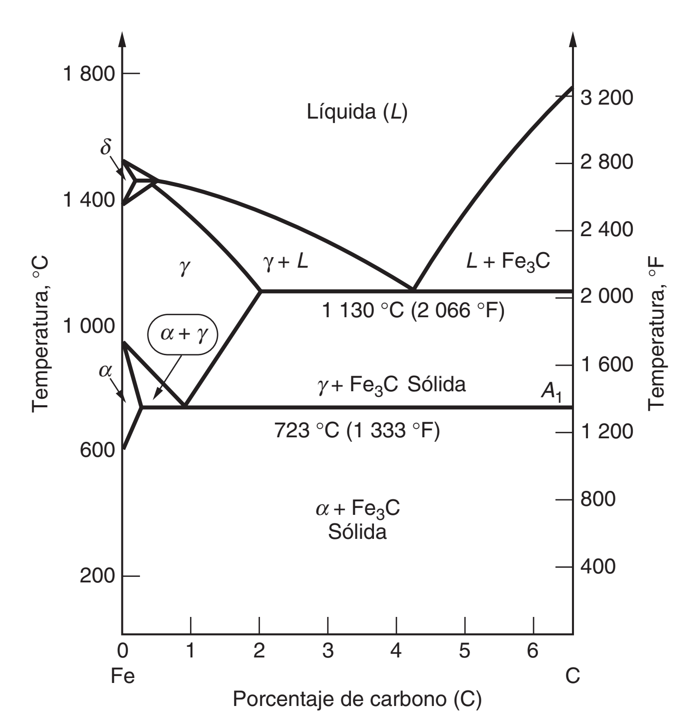


FIGURA 6.4 Diagrama de fase para el sistema hierro-carbono, hasta 6% de carbono.

Con 4.3% de carbono, en el diagrama se observa una composición eutéctica. Existe una característica similar en la región sólida del diagrama con 0.77% de carbón y 723 ºC (1 333 ºF). Ésta se denomina ***composición eutectoide***. Los aceros por debajo de este nivel de carbono se conocen como ***aceros hipoeutectoides***, y por arriba de ese nivel, de 0.77% a 2.1%, se les llama ***aceros hipereutectoides***.

Además de las fases mencionadas, otra fase es notable en el sistema de la aleación hierro-carbono. Ésta es la del Fe_3C, también llamada de ***cementita***, que es una fase intermedia: un compuesto metálico de hierro y carbono que es duro y frágil. A temperatura ambiente y en condiciones de equilibrio, las aleaciones de hierro-carbono forman un sistema de dos fases con niveles de carbono apenas por arriba de cero. El contenido de carbono de los aceros varía entre esos niveles bajos y cerca de 2.1%. Por arriba de 2.1% de C y hasta 4% o 5%, la aleación se define como ***hierro colado***.

6.2.2 Producción de hierro y acero

Este estudio de la producción de hierro y acero comienza con los yacimientos de mineral de hierro y otras materias primas que se requieren. Después se estudia la producción de hierro, en la que éste se reduce de los minerales, y la fabricación de acero, en la que se refina para obtener la pureza y composición (aleación) que se desean. Luego se consideran los procesos de fundición que se efectúan en la acería.

Yacimientos* de hierro y otras materias primas El mineral principal que se usa para producir hierro y acero es la hematita (Fe_2O_3). Otros minerales de hierro son la ***magnetita*** (Fe_3O_4), ***siderita*** ($FeCO_3$) y la ***limonita*** (Fe_2O_3-xH_2O) donde el valor de x es de alrededor de 1.5). Los yacimientos de hierro contienen de 50% a alrededor de 70% de hierro, en función de su ley** (la hematita contiene casi 70% de hierro). Además, hoy día se utilizan mucho los desechos de hierro y acero para producir hierro y acero.

Otras materias primas necesarias para reducir hierro de las menas son el coque y la roca caliza. El ***coque*** es un combustible de carbono alto que se produce por medio de calentar durante varias horas carbón bituminoso en una atmósfera escasa en oxígeno, para luego rociarle agua en torres de enfriamiento especiales. El coque desempeña dos funciones en el proceso de reducción: 1) es un combustible que suministra el calor para las reacciones químicas, y 2) produce monóxido de carbono (CO) para reducir el mineral de hierro. La ***caliza*** es una roca que contiene proporciones grandes de carbonato de calcio ($CaCO_3$). La caliza se utiliza en el proceso como fundente con el cual reaccionar y retirar las impurezas tales como escoria del hierro fundido.

Fabricación de hierro Para producir hierro, se coloca una carga de mineral, coque y caliza en la parte superior de un alto horno. Un ***alto horno*** es una cámara refractaria recta con diámetro de 9 a 11 m (30 a 35 ft) en su parte más ancha, y altura de 40 m (125 ft), en el que se fuerzan gases calientes dentro de la parte baja de la cámara a tasas elevadas para llevar a cabo la combustión y reducción del hierro. En las figuras 6.5 y 6.6 se ilustra un alto horno común y algunos de sus detalles técnicos. La carga desciende con lentitud desde la parte superior del horno hacia su base y se calienta a temperaturas de alrededor de 1 650 ºC (3 000 ºF). La combustión del coque se lleva a cabo con gases calientes (CO, H_2, CO_2, H_2O, N_2, O_2 y combustibles) que pasan hacia arriba a través de las capas de la carga de material. El gas CO tiene un efecto reductor en el mineral de hierro; la reacción (simplificada) se escribe como sigue (se usa hematita como el mineral de inicio):

$$Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2FeO + CO_2 \tag{6.3a}$$

---

* La palabra inglesa *ore* se traduce en el ambiente de la geología como mena, que es el material que se extrae de un yacimiento y que contiene el mineral de interés. En otras profesiones, *ore* se traduce como yacimiento, pero esto no es exacto porque de un yacimiento se extrae la mena. (N. del t.)

** Ley es el contenido de mineral en una mena. (N. del t.)

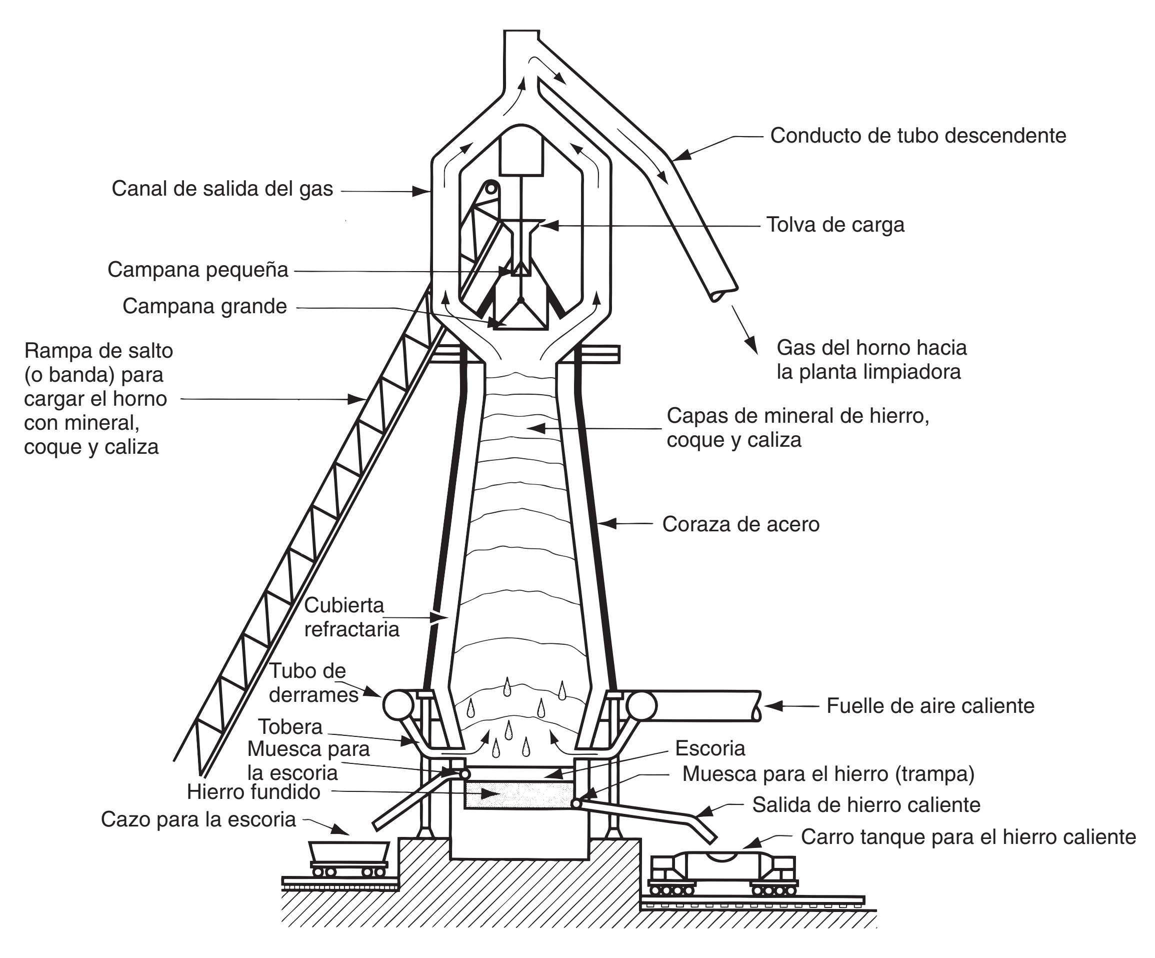
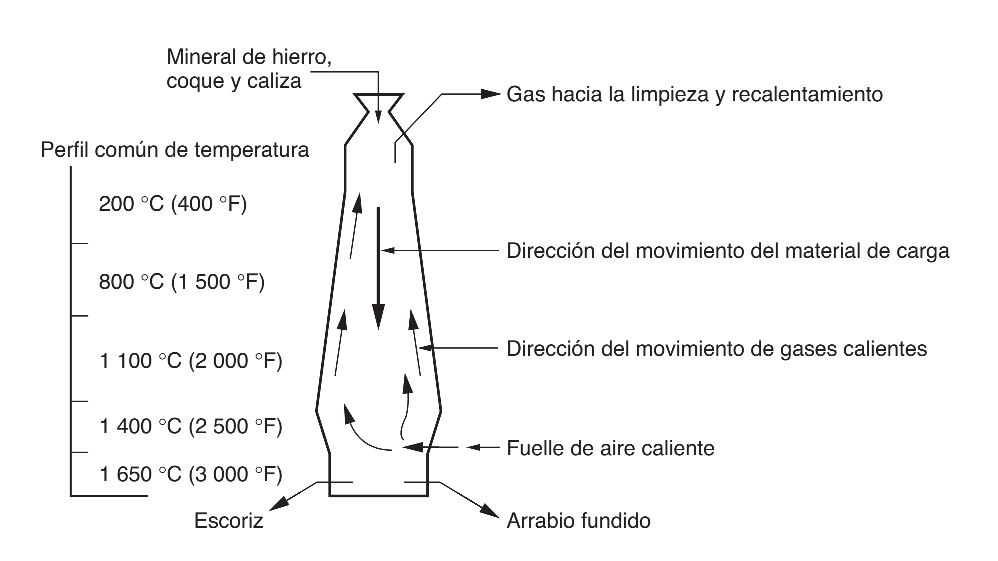


FIGURA 6.5 Sección transversal de un alto horno para fabricar hierro en la que se muestran los componentes principales.

FIGURA 6.6 Diagrama esquemático que indica detalles de la operación de un alto horno.



El dióxido de carbono reacciona con el coque para formar monóxido de carbono:

$$CO_2 + C(\text{coque}) \rightarrow 2CO \tag{6.3b}$$

que entonces realiza la reducción final del FeO a hierro:

$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2 \tag{6.3c}$$

El hierro fundido gotea y se colecta en la base del alto horno. Éste se lleva periódicamente a carros tanque para hierro fundido a fin de transferirlo a las operaciones siguientes de fabricación de acero.

El papel que juega la caliza se resume como sigue. En primer lugar, la caliza se reduce a cal (CaO) por calentamiento, así:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \tag{6.4}$$

La cal se combina con impurezas tales como sílice (SiO_2), azufre, (S) y alúmina (Al_2O_3) en reacciones que producen una escoria fundida que flota sobre el hierro.

Es instructivo notar que se requieren aproximadamente siete toneladas de materias primas para producir una tonelada de hierro. Las proporciones de los ingredientes son las siguientes: 2.0 ton de mineral de hierro, 1.0 ton de coque, 0.5 ton de caliza, y (aquí la estadística es sorprendente) 3.5 ton de gases. Una proporción significativa de los subproductos se recicla.

El hierro colectado en la base del alto horno llamado ***hierro de primera fundición*** (arrabio) contiene más del 4% de C, más otras impurezas: 0.3%–1.3% de Si, 0.5–2.0% de Mn, 0.1–1.0% de P, y 0.02–0.08% de S [9]. Se requiere más refinación del metal para obtener tanto hierro fundido como acero. Para convertir el arrabio en hierro fundido gris es común emplear un horno llamado cubilote (véase la sección 11.4.1). Para el acero, las composiciones deben controlarse estrechamente y las impurezas llevarse a niveles mucho más bajos.

Fabricación de acero Desde la mitad del siglo XIX, se han inventado cierto número de procesos para refinar hierro de primera fundición y obtener acero. Hoy día, los dos más importantes son el horno de oxígeno básico (BOF) y el eléctrico. Ambos se emplean para producir aceros al carbono y aleados.

El ***horno de oxígeno básico*** produce alrededor del 70% del acero de Estados Unidos. El BOF es una adaptación del convertidor Bessemer. Mientras que el proceso Bessemer utiliza aire que pasa a través del arrabio fundido para quemar las impurezas, el proceso de oxígeno básico utiliza oxígeno puro. En la figura 6.7 se presenta un diagrama del BOF convencional durante la mitad de una colada. El recipiente común del BOF mide cerca de 5 m (16 ft) de diámetro interno y procesa de 150 a 200 toneladas en una sola colada.

En la figura 6.8 se muestra la secuencia para fabricar acero en un BOF. En las plantas siderúrgicas integradas se transfiere el arrabio desde el alto horno al BOF en carros de ferrocarril llamados carros cuchara de hierro caliente. En la práctica moderna, al hierro fundido se agrega chatarra de acero por cerca del 30% de una carga normal del BOF. También se agrega cal (CaO). Después de la carga, se inserta la lanceta en el recipiente de modo que su punta se encuentre a 1.5 m (5 ft) por arriba de la superficie del hierro fundido. Se sopla O_2 a alta velocidad desde la lanceta, lo que provoca combustión y calentamiento en la superficie del recipiente del metal fundido. El carbono disuelto en el hierro y otras impurezas tales como silicio, manganeso y fósforo se oxidan. Las reacciones son

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO \text{ (también se produce } CO_2\text{)} \tag{6.5a}$$

$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2 \tag{6.5b}$$

$$2Mn + O_2 \rightarrow 2MnO \tag{6.5c}$$

$$4P + 5O_2 \rightarrow 2P_2O_5 \tag{6.5d}$$

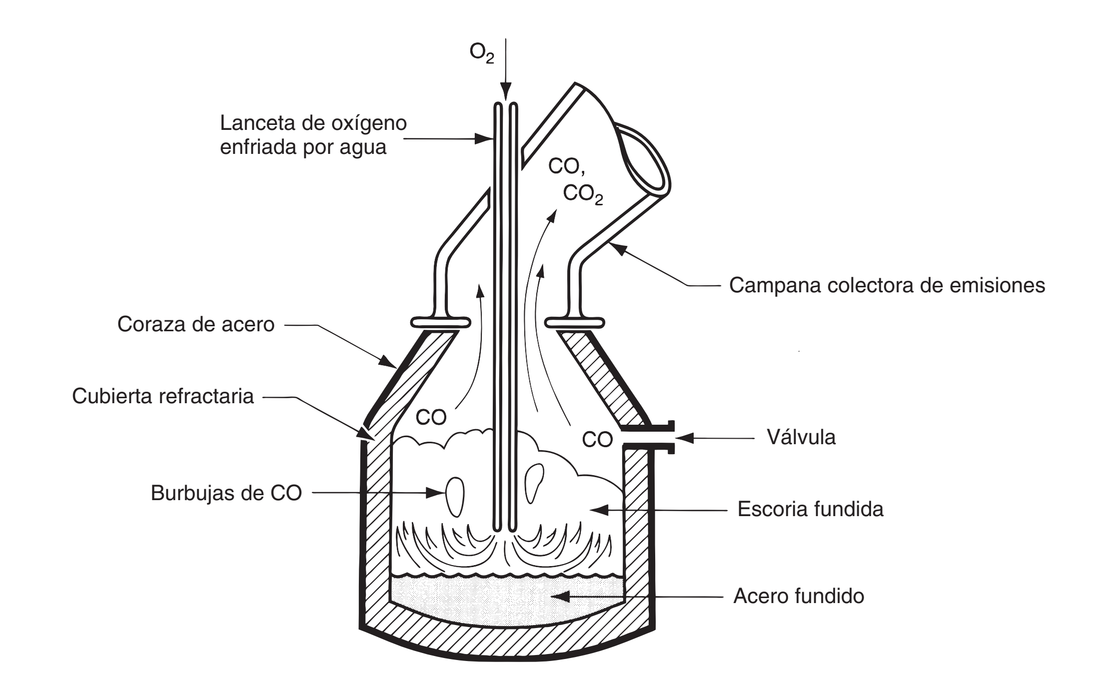
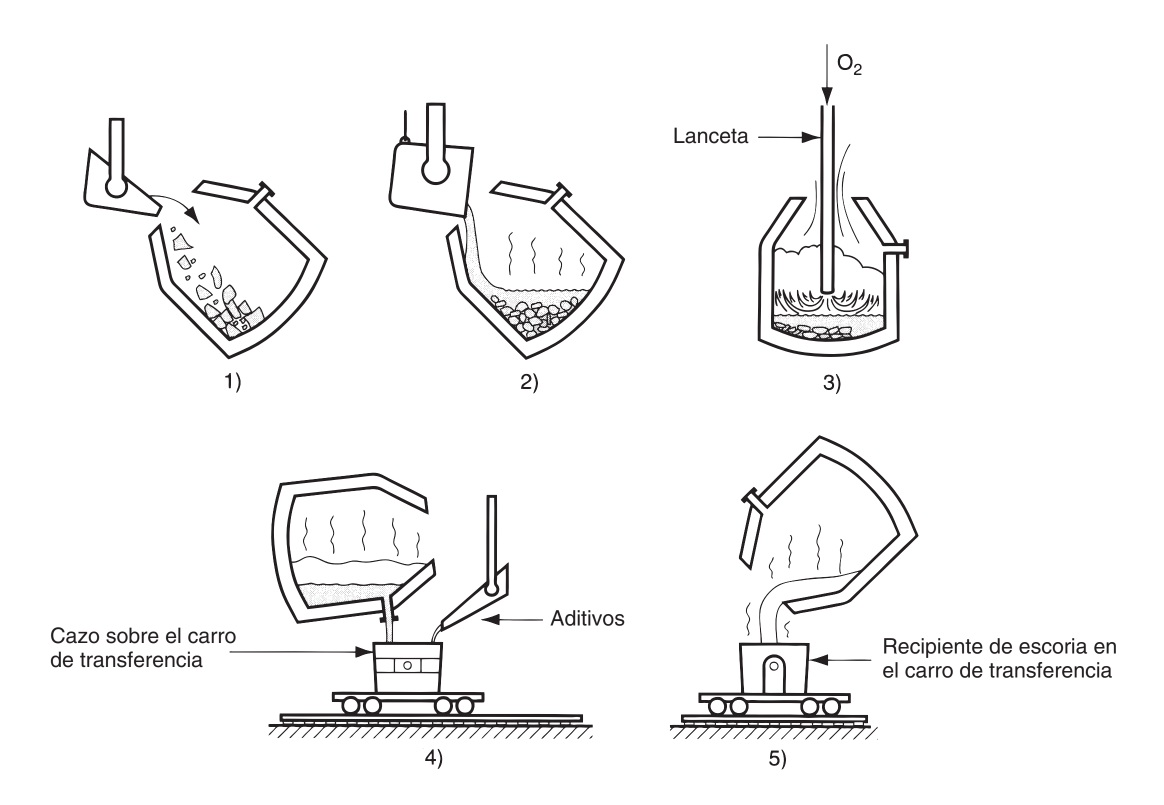


FIGURA 6.7 Horno de oxígeno básico que muestra el recipiente BOF durante el procesamiento de una colada.

FIGURA 6.8 Secuencia BOF durante un ciclo de procesamiento: 1) carga de chatarra y 2) arrabio; 3) soplado (véase la figura 6.7); 4) extracción del acero fundido; y 5) vaciado de la escoria.



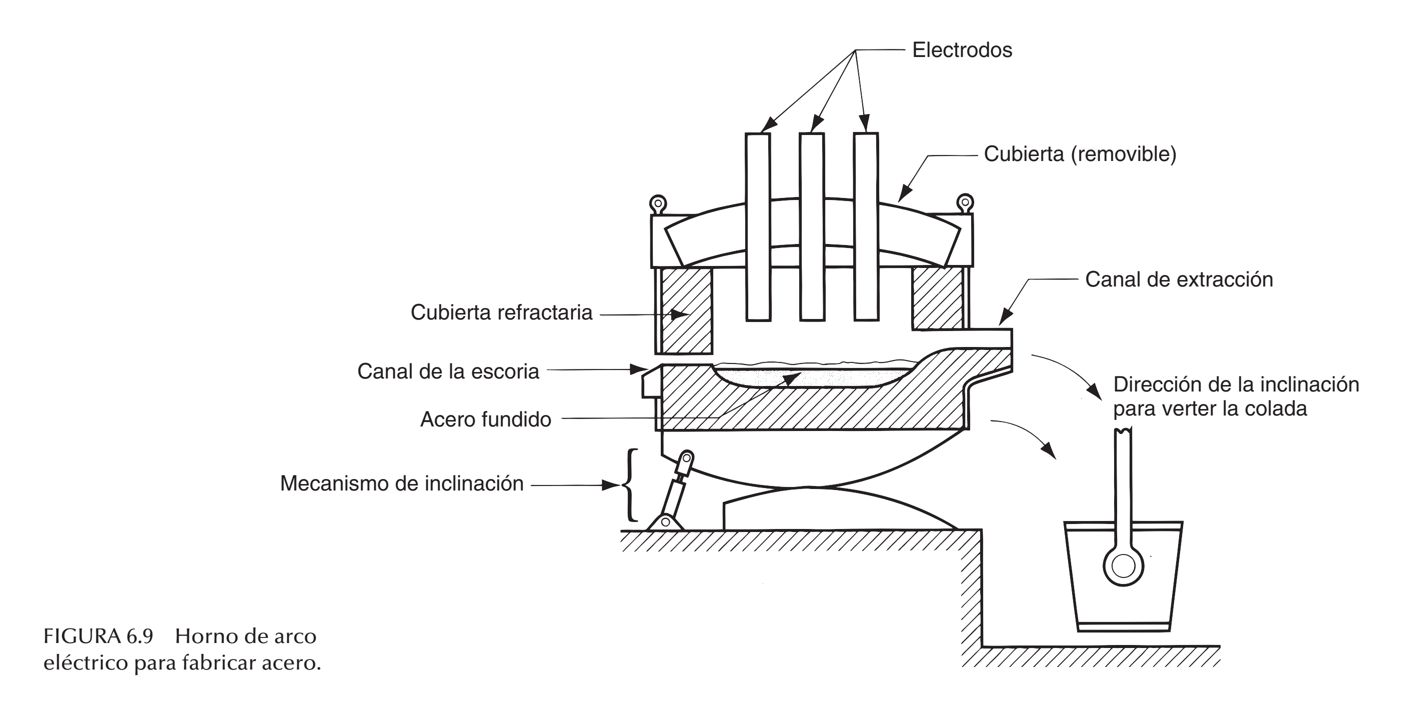


FIGURA 6.9 Horno de arco eléctrico para fabricar acero.

Los gases de CO y CO_2 que se producen en la primera reacción, escapan a través de la boca del recipiente del BOF y se captan en la campana de emisiones; los productos de las otras tres reacciones se retiran como escoria, con el uso de cal como elemento fundente. Durante el proceso, el contenido de C en el hierro disminuye en forma casi lineal con el tiempo, lo que permite un control muy predecible de los niveles de carbono en el acero. Después de refinarlo al nivel que se desea, el acero fundido se extrae; a la colada se vierten ingredientes de aleación y otros aditivos; después se extrae la escoria. En 20 min es posible procesar una colada de 200 ton de acero, aunque el ciclo completo (tiempo desde la introducción hasta la extracción) toma 45 min, aproximadamente.

Los avances recientes de la tecnología del proceso de oxígeno básico incluyen el uso de boquillas en fondo del recipiente, a través de las cuales se inyecta oxígeno en el hierro fundido. Con esto se logra una mejor mezcla que con la lanceta BOF convencional, lo que da como resultado tiempos más cortos de procesamiento (una reducción de cerca de 3 min), menor contenido de carbono y producciones más grandes.

El ***horno de arco eléctrico*** produce alrededor del 30% del acero de Estados Unidos. Aunque originalmente se usaba arrabio como la carga para este tipo de horno, hoy día las materias primas principales son chatarra de hierro y de acero. Los hornos de arco eléctrico se encuentran disponibles en varios diseños; el tipo de arco directo que se muestra en la figura 6.9 es el más económico actualmente. Estos hornos tienen cubiertas removibles para cargarlos desde arriba; la extracción se lleva a cabo por medio de la inclinación del horno completo. En el horno se carga chatarra de hierro y de acero seleccionadas por sus composiciones, junto con ingredientes de aleación y caliza (fundente), y se calientan por medio de un arco eléctrico que va de grandes electrodos a la carga de metal. La fundición total requiere cerca de 2 horas; el tiempo de introducción a extracción es de 4 horas. Es común que las capacidades de los hornos eléctricos varíen entre 25 y 100 toneladas por colada. Los hornos de arco eléctrico destacan por la mejor calidad del acero pero su costo por tonelada producida es mayor, en comparación con el del BOF. Por lo general, el horno de arco eléctrico se asocia con la producción de aceros de aleación, aceros para herramientas y aceros inoxidables.

Fundición de lingotes Los aceros producidos por hornos BOF o eléctricos se solidifican para procesarlos posteriormente, ya sea como lingotes fundidos o por fundición continua. Los ***lingotes*** de acero son fundiciones discretas y grandes que pesan menos desde 1 ton hasta 300 ton (el peso de la colada total). Los moldes de los lingotes están hechos de hierro

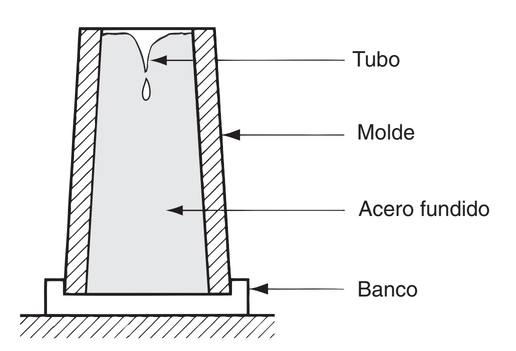


FIGURA 6.10 Molde de lingote común de fondo amplio, del tipo que se utiliza para fabricar acero.

al alto carbono y están abiertos arriba o abajo para retirar la colada solidificada. En la figura 6.10 se ilustra un ***molde de fondo amplio***. La sección transversal puede ser cuadrada, rectangular o redonda, y su perímetro por lo general es corrugado para incrementar el área superficial a fin de que se enfríe más rápido. El molde se coloca en una plataforma denominada ***banc*** o ***escabel***; después de solidificarse, el molde se eleva, y deja la fundición sobre el banco.

En el capítulo sobre los principios de la fundición (capítulo 10) se describe el proceso de solidificación de los lingotes, así como de otros tipos de fundidos. Debido a que los lingotes son fundidos grandes, el tiempo que se requiere para la solidificación, así como para la contracción asociada, es significativo. La porosidad ocasionada por la reacción del carbono y el oxígeno para formar CO durante el enfriamiento y la solidificación es un problema que debe enfrentarse en la fundición del lingote. Esos gases se liberan del acero fundido debido a su solubilidad reducida con la disminución de la temperatura. Es frecuente que los aceros fundidos sean tratados para limitar o impedir la evolución de CO gaseoso durante la solidificación. El tratamiento involucra agregar elementos tales como el Si y Al que reaccionan con el oxígeno disuelto en el acero fundido, de modo que éste no se encuentre disponible para la reacción del CO. Así, la estructura del acero sólido está libre de poros y otros defectos causados por la formación de gas.

Fundición o colada continua La fundición o colada continua se aplica mucho en la producción de aluminio y cobre, pero es mucho más destacada en la de acero. El proceso consiste en remplazar los lingotes fundidos porque la productividad se incrementa en forma notable. La fundición de lingotes es un proceso discreto. Como los moldes son relativamente grandes, el tiempo de solidificación es significativo. El tiempo para que se solidifique un lingote grande de acero puede ser de 10 a 12 horas. El uso de un fundido continuo reduce el tiempo de solidificación en un orden de magnitud.

El proceso de fundición continua, también llamado ***fundición de filamento***, se ilustra en la figura 6.11. El acero fundido se vierte desde un recipiente hacia un contenedor temporal llamado ***cacerola***, que dosifica el metal hacia uno o más moldes de fundición continua. El acero comienza a solidificarse en las regiones exteriores conforme viaja hacia abajo a través del molde enfriado por agua. Un rocío de agua acelera el proceso de enfriamiento. Mientras está caliente y es plástico, el metal se cambia de orientación vertical a horizontal. Entonces se corta en secciones o se alimenta en forma continua a un laminador (véase la sección 21.1) en el que se le da forma de lámina o bloque de acero u otras secciones transversales.

6.2.3 Aceros

El ***acero*** es una aleación de hierro que tiene un contenido de carbono que varía entre 0.02% y 2.11%. Es frecuente que también incluya otros ingredientes de aleación: manganeso, cromo, níquel y molibdeno; pero es el contenido de carbono lo que convierte al hierro en acero. Existen cientos de composiciones de acero disponibles en el comercio. Aquí, para propósitos de organización se agrupan en las categorías siguientes: 1) aceros al carbón simples, 2) aceros bajos de aleación, 3) aceros inoxidables y 4) aceros para herramientas.

FIGURA 6.11 Fundición continua; el acero se vierte en la cacerola y se distribuye a un molde de fundición continua enfriado por agua; se solidifica conforme se mueve hacia abajo a través del molde. Se ha exagerado el espesor del bloque para mayor claridad.

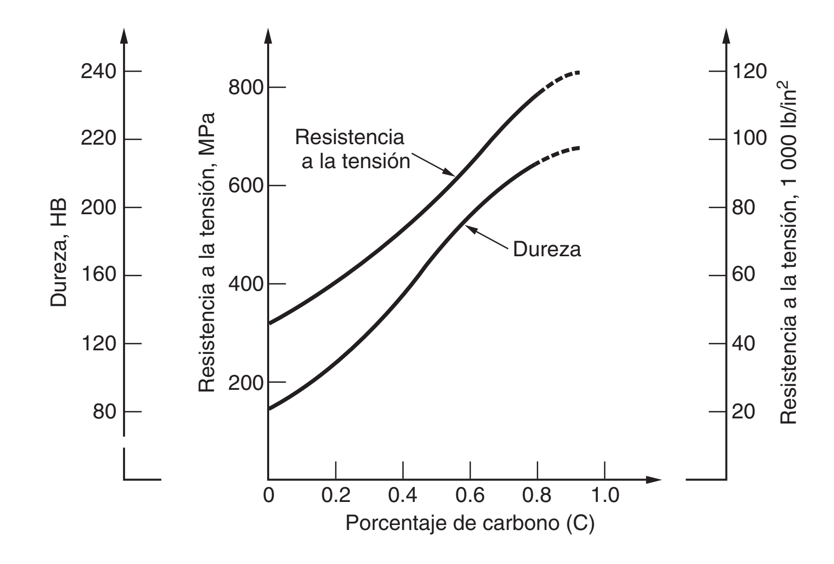


FIGURA 6.12 Resistencia a la tensión y dureza, como función del contenido de carbono en un acero al carbono simple (rolado en caliente).

Aceros al carbono Estos aceros contienen carbono como elemento principal de la aleación, y sólo pequeñas cantidades de otros elementos (lo normal es alrededor de 0.5% de manganeso). La resistencia de los aceros simples al carbono se incrementa con el contenido de éste; en la figura 6.12 se presenta una gráfica común de esa relación.

De acuerdo con un esquema de nomenclatura creado por el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), los aceros simples al carbono se especifican por medio de un sistema numérico de cuatro dígitos: 10XX, donde el 10 indica que el acero es al carbono simple, y XX señala el porcentaje de carbono en centésimas de puntos porcentuales. Por ejemplo, un acero 1020 contiene 0.20% de C. Es común que los aceros simples al carbono se clasifiquen en tres grupos, de acuerdo con su contenido de carbono:

1. ***Aceros al bajo carbono.*** Contienen menos del 0.20% de C y son por mucho los más utilizados. Las aplicaciones normales son en las piezas automotrices de lámina, placa de acero para la fabricación y vías férreas. Es relativamente fácil dar forma a estos aceros, lo cual los hace de uso muy difundido en aplicaciones que no requieren una resistencia elevada. Por lo general, también los aceros fundidos caen en este rango de carbono.
2. ***Aceros al medio carbono.*** Su contenido de carbono varía entre 0.20% y 0.50%, y se especifican para aplicaciones que requieren una resistencia mayor que las de los aceros al bajo carbono. Las aplicaciones incluyen componentes de maquinaria y piezas de motores tales como cigüeñales y rodillos de transmisión.
3. ***Aceros al alto carbono.*** Contienen carbono en cantidades superiores a 0.50% y se especifican para aplicaciones que necesitan resistencias aún mayores y también rigidez y dureza. Algunos ejemplos son resortes, herramientas y hojas de corte y piezas resistentes al desgaste.

El contenido creciente de carbono da resistencia y dureza al acero, pero reduce su ductilidad. Asimismo, los aceros al alto carbono pueden ser tratados para formar martensita, lo que los hace muy duros y fuertes (véase la sección 27.2).

Aceros de baja aleación Son aleaciones de hierro–carbono que contienen elementos adicionales en cantidades que totalizan menos de 5% del peso. Debido a estas adiciones, los aceros de baja aleación tienen propiedades mecánicas superiores a las de los simples al carbono para aplicaciones dadas. Las propiedades superiores por lo general significan más resistencia, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste, tenacidad y combinaciones más deseables de éstas. Es frecuente que se requiera tratamiento térmico para lograr propiedades mejoradas.

Los elementos comunes de aleación que se agregan al acero son cromo, manganeso, molibdeno, níquel y vanadio, a veces en forma individual pero por lo general en combinaciones. Es frecuente que estos elementos formen soluciones sólidas con hierro y compuestos metálicos con carbono (carburos), lo que supone que hay suficiente carbono presente para efectuar la reacción. Los efectos de los ingredientes principales de la aleación se resumen como sigue:

- El ***cromo*** (Cr) mejora la resistencia, dureza, resistencia al desgaste y dureza en caliente. Es uno de los ingredientes de aleación más eficaces para incrementar la templabilidad (véase la sección 27.2.3). En proporciones significativas, el Cr mejora la resistencia a la corrosión.
- El ***manganeso*** (Mn) mejora la resistencia y dureza del acero. Cuando éste se encuentra caliente, la templabilidad mejora con el aumento de manganeso. Debido a estos beneficios, el manganeso es un ingrediente que se usa mucho en las aleaciones de acero.
- El ***molibdeno*** (Mo) incrementa la tenacidad y dureza en caliente. También mejora la templabilidad y forma carburos que dan resistencia al desgaste.
- El ***níquel*** (Ni) mejora la resistencia y la tenacidad. Incrementa la dureza pero no tanto como los otros elementos de las aleaciones del acero. En cantidades significativas mejora la resistencia a la corrosión y es el otro ingrediente principal (además del cromo) de ciertos tipos de acero inoxidable.

TABLA 6.2 Designaciones AISI-SAE de los aceros.

		Análisis químico nominal, %							
Código	Nombre del acero	Cr	Mn	Mo	Ni	V	P	S	Si
10XX	Al carbono		0.4				0.04	0.05	
11XX	Resulfurado		0.9				0.01	0.12	0.01
12XX	Resulfurado, refosforado		0.9				0.10	0.22	0.01
13XX	Manganeso		1.7				0.04	0.04	0.3
20XX	Aceros al níquel		0.5		0.6		0.04	0.04	0.2
31XX	Níquel-cromo	0.6			1.2		0.04	0.04	0.3
40XX	Molibdeno		0.8	0.25			0.04	0.04	0.2
41XX	Cromo-molibdeno	1.0	0.8	0.2			0.04	0.04	0.3
43XX	Ni-Cr-Mo	0.8	0.7	0.25	1.8		0.04	0.04	0.2
46XX	Níquel-molibdeno		0.6	0.25	1.8		0.04	0.04	0.3
47XX	Ni–Cr–Mo	0.4	0.6	0.2	1.0		0.04	0.04	0.3
48XX	Níquel-molibdeno		0.6	0.25	3.5		0.04	0.04	0.3
50XX	Cromo	0.5	0.4				0.04	0.04	0.3
52XX	Cromo	1.4	0.4				0.02	0.02	0.3
61XX	Cr-vanadio	0.8	0.8			0.1	0.04	0.04	0.3
81XX	Ni–Cr–Mo	0.4	0.8	0.1	0.3		0.04	0.04	0.3
86XX	Ni–Cr–Mo	0.5	0.8	0.2	0.5		0.04	0.04	0.3
88XX	Ni–Cr–Mo	0.5	0.8	0.35	0.5		0.04	0.04	0.3
92XX	Silicio-manganeso		0.8				0.04	0.04	2.0
93XX	Ni–Cr–Mo	1.2	0.6	0.1	3.2		0.02	0.02	0.3
98XX	Ni–Cr–Mo	0.8	0.8	0.25	1.0		0.04	0.04	0.3

Fuente: [9].

- El ***vanadio*** (V) inhibe el crecimiento de granos durante el procesamiento a temperaturas elevadas, lo cual mejora la resistencia y tenacidad del acero. También forma carburos que incrementan la resistencia al desgaste.

En la tabla 6.2 se presentan las designaciones AISI-SAE de muchos aceros de baja aleación, las que indican el análisis químico nominal. Como antes, el contenido del carbono está especificado por el término XX expresado en 1/100% de carbono. Para que esté completa, se incluyen aceros al carbono (10XX). Para dar una idea de las propiedades que tienen algunos de estos aceros, se compiló la tabla 6.3, que enlista el tratamiento a que se sujeta el acero para darle fortalecimiento a su resistencia y ductilidad.

Los aceros de baja aleación no sueldan con facilidad, en especial con niveles de carbono medios y altos. Desde la década de 1960 la investigación ha estado dirigida al desarrollo de aceros al bajo carbono y baja aleación, que tengan razones mejores de resistencia/peso que los aceros al carbono simples, pero que suelden mejor que los de baja aleación. Los productos creados a partir de esos trabajos son los ***aceros de alta resistencia y baja aleación*** (HSLA). Por lo general tienen un contenido bajo de carbono (en el rango de 0.10 a 0.30% de C) más cantidades relativamente pequeñas de ingredientes de aleación (generalmente alrededor del 3% del total, de elementos tales como Mn, Cu, Ni y Cr). Los aceros HSLA están rolados en caliente en condiciones controladas diseñadas para proporcionar mejor resistencia en comparación con los aceros simples al carbono, pero sin sacrificar la facilidad de darles forma o soldarlos. La resistencia se les da por medio de una aleación de solución sólida: el tratamiento térmico no es factible debido a su bajo contenido de carbono. En la tabla 6.3 se enlista un acero HSLA, junto con sus propiedades (la química es: 0.12 C, 0.60 Mn, 1.1 Ni, 1.1 Cr, 0.35 Mo y 0.4 Si).

Aceros inoxidables Los ***aceros inoxidables*** constituyen un grupo de aceros altamente aleados diseñados para proporcionar gran resistencia a la corrosión. El elemento principal de la aleación del acero inoxidable es el cromo, por lo general arriba del 15%. El cromo de la aleación forma una película de óxido impermeable, delgada, que en una atmósfera oxidante protege a la superficie de la corrosión. El níquel es otro ingrediente de aleación que se emplea

TABLA 6.3 Tratamientos y propiedades mecánicas de aceros seleccionados.

Código	Tratamiento[a]	Resistencia a la tensión MPa	Resistencia a la tensión lb/in²	Elongación, %
1010	HR	304	44 000	47
1010	CD	366	53 000	12
1020	HR	380	55 000	28
1020	CD	421	61 000	15
1040	HR	517	75 000	20
1040	CD	587	85 000	10
1055	HT	897	130 000	16
1315	Ninguno	545	79 000	34
2030	Ninguno	566	82 000	32
3130	HT	697	101 000	28
4130	HT	890	129 000	17
4140	HT	918	133 000	16
4340	HT	1 279	185 000	12
4815	HT	635	92 000	27
9260	HT	994	144 000	18
HSLA	Ninguno	586	85 000	20

Recopilada a partir de las referencias [5], [9] y otras fuentes.

[a] HR = rolado en caliente; CD = estirado en frío; HT = tratamiento térmico que involucra calentamiento y enfriamiento por inmersión, seguidos de templado para producir martensita templada (véase la sección 27.2).

en ciertos aceros inoxidables para incrementar la protección contra la corrosión. El carbono se utiliza para dar resistencia y endurecer el metal; sin embargo, el contenido creciente de carbono tiene el efecto de reducir la protección contra la corrosión debido a que el carburo de cromo se forma para reducir la cantidad de Cr disponible en la aleación.

Además de la resistencia a la corrosión, los aceros inoxidables se destacan por su combinación de resistencia y ductilidad. Aunque estas propiedades son deseables en muchas aplicaciones, por lo general hacen a dichas aleaciones difíciles de trabajar en la manufactura. Asimismo, los aceros inoxidables son significativamente más caros que los aceros al carbono o los de baja aleación.

Los aceros inoxidables se dividen por tradición en tres grupos que reciben su nombre por la fase predominante presente en la aleación a temperatura ambiente:

1. ***Inoxidables austeníticos***. Su composición normal es de alrededor de 18% de Cr y 8% de Ni, y son los más resistentes a la corrosión de los tres grupos. Debido a esa composición, a veces se les identifica como inoxidables 18-8. No son magnéticos y son muy dúctiles, pero muestran un endurecimiento por trabajo significativo. El níquel tiene el efecto de agrandar la región austenítica en el diagrama de fase de hierro-carbono, lo que los hace estables a temperatura ambiente. Los aceros inoxidables austeníticos se emplean para fabricar equipo de procesamiento químico y de alimentos, así como piezas de maquinaria que requieren alta resistencia a la corrosión.
2. ***Inoxidables ferríticos***. Contienen de 15% a 20% de cromo, poco carbono y nada de níquel. Esto produce una fase de ferrita a temperatura ambiente. Los aceros inoxidables ferríticos son magnéticos y menos dúctiles y resistentes a la corrosión que los austeníticos. Las piezas fabricadas con ellos van desde utensilios de cocina hasta componentes de motores a reacción.
3. ***Inoxidables martensíticos***. Tienen un contenido de carbono más elevado que los ferríticos, lo que permite que se les dé resistencia por medio de tratamiento térmico (véase la sección 27.2). Tienen hasta 18% de Cr pero nada de Ni. Son fuertes, duros y resistentes a la fatiga, pero por lo general no tan resistentes a la corrosión como los de los otros dos grupos. Los productos más comunes incluyen instrumentos de corte y quirúrgicos.

   La mayor parte de aceros inoxidables reciben su nombre con un esquema de numeración de la AISI, de tres dígitos. El primero indica el tipo general y los últimos dos dan el grado específico dentro del tipo. La tabla 6.4 enlista los aceros inoxidables más comunes con sus composiciones normales y propiedades mecánicas.

TABLA 6.4 Composiciones y propiedades mecánicas de aceros inoxidables seleccionados.

	Análisis químico, %						Resistencia a la tensión		
Tipo	Fe	Cr	Ni	C	Mn	Otro[a]	MPa	lb/in²	Elongación, %
Austenítico									
301	73	17	7	0.15	2		620	90 000	40
302	71	18	8	0.15	2		515	75 000	40
304	69	19	9	0.08	2		515	75 000	40
309	61	23	13	0.20	2		515	75 000	40
316	65	17	12	0.08	2	2.5 Mo	515	75 000	40
Ferrítico									
405	85	13	—	0.08	1		415	60 000	20
430	81	17	—	0.12	1		415	60 000	20
Martensítico									
403	86	12	—	0.15	1		485	70 000	20
403[b]	86	12	—	0.15	1		825	120 000	12
416	85	13	—	0.15	1		485	70 000	20
416[b]	85	13	—	0.15	1		965	140 000	10
440	81	17	—	0.65	1		725	105 000	20
440[b]	81	17	—	0.65	1		1 790	260 000	5

Recopilado a partir de la referencia [9].

[a] Todos los grados de la tabla contienen cerca de 1% (o menos) de silicio más cantidades pequeñas (muy por debajo del 1%) de fósforo y azufre y otros elementos tales como aluminio.

[b] Tratado térmicamente.

Los aceros inoxidables tradicionales se crearon a principios del siglo XX. Desde entonces, se han creado varias aleaciones de acero que tienen buena resistencia a la corrosión y otras propiedades deseables. Éstas también se clasifican como aceros inoxidables; la lista continúa así:

4. ***Aceros inoxidables de precipitación***. Tienen una composición química típica de 17% de Cr y 7% de Ni, con cantidades pequeñas adicionales de elementos de aleación tales como aluminio, cobre, titanio y molibdeno. La característica que los distingue del resto de los inoxidables es que pueden fortalecerse por medio de endurecimiento por precipitación (véase la sección 27.3). A temperaturas elevadas mantienen su fuerza y resistencia a la corrosión, lo que hace que estas aleaciones sean apropiadas para aplicaciones aeroespaciales.
5. ***Inoxidables dúplex***. Poseen una estructura que es una mezcla de austenita y ferrita en cantidades aproximadamente iguales. Su resistencia a la corrosión es similar a los grados austeníticos y muestran resistencia mejorada al agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Las aplicaciones incluyen intercambiadores de calor, bombas y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Aceros para herramientas Los aceros para herramientas son una clase (por lo general) altamente aleada diseñada para su uso en herramientas de corte industriales, troqueles y moldes. Para desempeñarse en esas aplicaciones deben poseer resistencia elevada, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste y tenacidad a los impactos. Para obtener estas propiedades los aceros para herramienta se tratan térmicamente. Las razones principales para los niveles altos de elementos de aleación son: 1) dureza mejorada, 2) distorsión reducida durante el tratamiento con calor, 3) dureza en caliente, 4) formación de carburos metálicos duros para que sean resistentes a la abrasión, y 5) tenacidad mejorada.

Los aceros para herramientas se dividen en tipos de acuerdo con la aplicación y composición. La AISI utiliza un esquema de clasificación que incluye un prefijo de una letra para identificar el acero para herramienta. En la lista de la tabla 6.5 que sigue, se mencionan esos tipos de acero, se identifica el prefijo y se presentan algunas composiciones comunes.

TABLA 6.5 Aceros para herramienta con el prefijo de identificación de AISI, con ejemplos de composición y valores comunes de dureza.

AISI	Ejemplo	Análisis químico, %[a]							Dureza, HRC
		C	Cr	Mn	Mo	Ni	V	W	
T	T1	0.7	4.0				1.0	18.0	65
M	M2	0.8	4.0		5.0		2.0	6.0	65
H	H11	0.4	5.0		1.5		0.4		55
D	D1	1.0	12.0		1.0				60
A	A2	1.0	5.0		1.0				60
O	O1	0.9	0.5	1.0				0.5	61
W	W1	1.0							63
S	S1	0.5	1.5					2.5	50
P	P20	0.4	1.7		0.4				40[b]
L	L6	0.7	0.8		0.2	1.5			45[b]

[a] Composición porcentual redondeada a la décima más cercana.
[b] Dureza estimada.

T, M ***Aceros para herramientas de alta velocidad***. Se usan como herramientas de corte en procesos de maquinado (véase la sección 23.22). Se formulan para que tengan gran resistencia al desgaste y dureza en caliente. Los aceros de alta velocidad originales (HSS) se crearon alrededor de 1900. Permitieron incrementos muy grandes en la velocidad de corte en comparación con herramientas que se usaban con anterioridad; de ahí su nombre. Las dos designaciones AISI indican el elemento principal de la aleación: T por el tungsteno y M por el molibdeno.

H ***Aceros de herramientas para trabajos en caliente***. Están pensados para usarse con troqueles de trabajos en caliente para forjado, extrusión y moldes para fundición.

D ***Aceros de herramientas para trabajos en frío***. Son aceros para troqueles que se emplean en operaciones de trabajo en frío, tales como moldear láminas metálicas, extrusión en frío y ciertas operaciones de forja. La designación D es por dado (*die*). Se relacionan de cerca con las designaciones de AISI A y O, que son para endurecimiento con aire (*air*) y aceite (*oil*). Proporcionan buena resistencia al desgaste y una distorsión baja.

W ***Aceros para herramienta de endurecimiento por agua***. Tienen contenido elevado de carbono con poco o nada de otros elementos de aleación. Sólo pueden endurecerse por enfriamiento por inmersión rápido en agua. Se emplean mucho debido a su bajo costo, pero se limitan a aplicaciones de temperatura baja. Una aplicación común son los troqueles de cabezales en frío.

S ***Aceros de herramientas resistentes a los golpes***. Están hechos para usarse en aplicaciones en las que se requiere mucha tenacidad, como en muchos cortes de lámina metálica, punzonado y operaciones de doblado.

P ***Aceros para moldes***. Se utilizan para fabricar moldes para plásticos y caucho.

L ***Aceros para herramientas de baja aleación***. Por lo general se reservan para aplicaciones especiales.

Los aceros para herramientas no son los únicos materiales para ellas. Los aceros al carbono, de baja aleación e inoxidables se emplean para muchas aplicaciones de herramientas y troqueles. Los hierros colados y ciertas aleaciones no ferrosas también son apropiados para algunas aplicaciones de herramientas. Además, varios materiales cerámicos (por ejemplo, Al_2O_3) se usan como inserciones cortantes de alta velocidad, abrasivos y otro tipo de herramientas.

6.2.4 Hierros colados

El ***hierro colado*** es una aleación de hierro que contiene de 2.1% a 4% de carbono, y de 1% a 3% de silicio. Su composición lo hace muy apropiado como metal de fundición. En

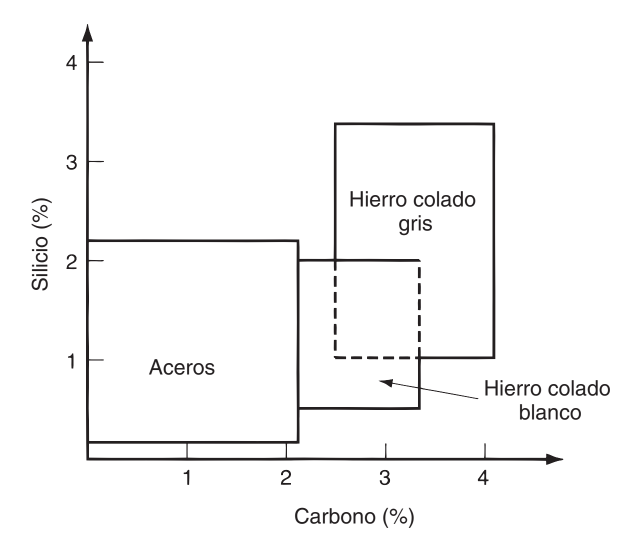


FIGURA 6.13 Composiciones de carbono y silicio para hierros colados, en comparación con los aceros (la mayor parte de éstos tienen un contenido relativamente bajo; los aceros de fundición tienen el contenido de Si más alto). El hierro dúctil se forma por medio de un tratamiento especial de fusión y vaciado de hierro fundido gris, y el maleable se elabora con tratamiento térmico del hierro colado blanco.

realidad, el peso en toneladas de los artículos de hierro colado es varias veces el de todas las demás piezas de metales fundidos combinados (con excepción de los lingotes que se fabrican durante la producción de acero y que posteriormente son rolados en forma de barras, láminas y otras formas similares). El peso total en toneladas del hierro colado ocupa el segundo lugar, pero sólo con respecto al acero entre todos los metales.

Entre los diversos tipos de hierro colado, el más importante es el gris. Otros tipos incluyen el hierro dúctil, el hierro colado blanco, el hierro maleable y varios hierros colados de aleaciones. Las composiciones comunes de los hierros colados gris y blanco se muestran en la figura 6.13, donde se indica su relación con el acero fundido. Los hierros dúctiles y los maleables poseen químicas similares a las de los hierros gris y blanco, respectivamente, pero resultan de tratamientos especiales que se describirán más adelante. En la tabla 6.6 se presenta una lista de las composiciones químicas de los tipos principales, así como de sus propiedades mecánicas.

Hierro colado gris Éste tiene el tonelaje mayor entre los hierros colados. Tiene una composición que va de 2.5% a 4% de carbono y de 1% a 3% de silicio. Esta química da como resultado la formación de escamas de grafito (carbono) distribuidas en todo el cuerpo fundido hasta que se solidifica. La estructura ocasiona que la superficie del metal adquiera un color

TABLA 6.6 Composiciones y propiedades químicas de hierros colados seleccionados.

	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		
Tipo	Fe	C	Si	Mn	Otro[a]	MPa	lb/in^2	Elongación, %
Hierros colados grises								
ASTM Clase 20	93.0	3.5	2.5	0.65		138	20 000	0.6
ASTM Clase 30	93.6	3.2	2.1	0.75		207	30 000	0.6
ASTM Clase 40	93.8	3.1	1.9	0.85		276	40 000	0.6
ASTM Clase 50	93.5	3.0	1.6	1.0	0.67 Mo	345	50 000	0.6
Hierros dúctiles								
ASTM A395	94.4	3.0	2.5			414	60 000	18
ASTM A476	93.8	3.0	3.0			552	80 000	3
Hierro colado blanco								
Bajo C	92.5	2.5	1.3	0.4	1.5Ni, 1Cr, 0.5Mo	276	40 000	0
Hierros maleables								
Ferrítico	95.3	2.6	1.4	0.4		345	50 000	10
Perlítico	95.1	2.4	1.4	0.8		414	60 000	10

Recopilado a partir de la referencia [9]. Los hierros colados se identifican con varios sistemas. Se ha intentado indicar el grado del hierro colado en particular con el empleo de la identificación más común para cada tipo.

[a] Los hierros colados también contienen fósforo y azufre, por lo general menos de 0.3%.

gris cuando se fractura, de donde adquiere su nombre. La dispersión de las escamas de grafito es responsable de dos propiedades atractivas: 1) buen amortiguamiento a la vibración, que es deseable en los motores y otra clase de maquinaria, y 2) cualidades de lubricación interna, lo que hace maquinable al metal fundido.

La resistencia del hierro colado gris abarca un rango significativo. La American Society for Testing of Materials (ASTM) usa un método de clasificación para el hierro colado gris hecho para proporcionar una especificación para la resistencia a la tensión (TS) mínima de varias clases: el hierro colado gris de Clase 20 tiene una TS de 20 000 lb/in^2, la Clase 30 tiene una TS de 30 000 lb/in^2, y así sucesivamente, hasta llegar a 70 000 lb/in^2 (véase la tabla 6.6 para la TS equivalente en unidades métricas). La resistencia a la compresión del hierro colado gris es significativamente mayor que a la tensión. Las propiedades de la pieza fundida se pueden controlar hasta cierto grado por medio del tratamiento térmico. La ductilidad del hierro colado gris es muy baja; es un material relativamente frágil. Los productos hechos de hierro colado gris incluyen bloques y cárteres de motores automotrices, carcasas de motor y bases para máquinas herramientas.

Hierro dúctil Este es un hierro con la composición del gris en el que el metal fundido recibe tratamiento químico antes de vaciarlo para ocasionar la formación de esferoides de grafito en lugar de escamas. Esto da como resultado un hierro más dúctil y fuerte, de ahí su nombre. Las aplicaciones incluyen componentes de maquinaria que requieren resistencia elevada y buena resistencia al desgaste.

Hierro colado blanco Este hierro colado tiene menos carbono y silicio que el gris. Se forma por un enfriamiento más rápido del metal fundido después del vertido, lo que hace que el carbono permanezca en combinación química con el hierro en forma de cementita (Fe_3C), en vez de precipitarse de la solución en forma de escamas. Cuando se fractura, la superficie adquiere una apariencia cristalina blanca que le da su nombre al hierro. Debido a la cementita, el hierro fundido blanco es duro y frágil, y su resistencia al desgaste es excelente. La resistencia es buena, con un valor común de TS de 276 MPa (40 000 lb/in^2). Estas propiedades hacen que el hierro colado blanco sea apropiado para aplicaciones en las que se requiere resistencia al desgaste. Un buen ejemplo son las zapatas de los frenos de un ferrocarril.

Hierro maleable Cuando las piezas fundidas de hierro colado blanco se tratan térmicamente para separar el carbono de la solución y formar agregados de grafito, el metal que resulta se llama hierro maleable. La microestructura nueva posee ductilidad sustancial (hasta 20% de elongación), una diferencia significativa con el metal a partir del cual se transformó. Los productos comunes hechos de hierro colado maleable, incluyen ajustes y bisagras para tubos, ciertos componentes de máquina y piezas de equipo ferroviario.

Hierros de aleaciones fundidas Los hierros colados pueden estar aleados para buscar propiedades y aplicaciones especiales. Estas aleaciones de hierro colado se clasifican como sigue: 1) tipos tratables térmicamente que pueden endurecerse por medio de la formación de martensita; 2) tipos resistentes a la corrosión, cuyos elementos de aleación incluyen níquel y cromo, y 3) tipos resistentes al calor que contienen proporciones elevadas de níquel para tener dureza en caliente y resistencia a la oxidación por alta temperatura.

6.3 METALES NO FERROSOS

Los metales no ferrosos incluyen elementos y aleaciones metálicas que no se basan en el hierro. Los metales más importantes de la ingeniería en el grupo de los no ferrosos son el aluminio, el cobre, el magnesio, el níquel, el titanio y el zinc, así como sus aleaciones.

Aunque los metales no ferrosos como grupo no igualan la resistencia de los aceros, ciertas aleaciones no ferrosas tienen resistencia a la corrosión o relaciones resistencia/peso que las hacen competitivas ante los aceros para aplicaciones con esfuerzos moderados a

TABLA 6.1 (*continuación*); *b*) Aluminio.

Símbolo:	Al	Mineral principal:	Bauxita (mezcla impura de Al_2O_3 y $Al(OH)_3$).
Número atómico:	13	Elementos de aleación:	Cobre, manganeso, silicio y zinc.
Gravedad específica:	2.7	Aplicaciones comunes:	Contenedores (latas de aluminio), láminas para envolturas, conductores eléctricos, vasijas y cacerolas, piezas para construcción, aeroespaciales automotrices y otros usos en los que el poco peso es importante.
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	660 °C (1 220 °F)		
Módulo de elasticidad:	69 000 MPa (10×10^6 lb/in^2)		

altos. Además, muchos de los metales no ferrosos tienen propiedades adicionales a las mecánicas que los hacen ideales para aplicaciones en las que el acero sería inapropiado. Por ejemplo, el cobre tiene una de las resistividades más bajas entre los metales, y se usa ampliamente para fabricar conductores eléctricos. El aluminio es un conductor térmico excelente, y sus aplicaciones incluyen intercambiadores de calor y trastos de cocina. También es uno de los metales a los que se le da forma con mayor facilidad y por esa razón se le valora mucho. El zinc tiene un punto de fusión relativamente bajo, por lo que se le utiliza de manera amplia en las operaciones de fundición a troquel. Los metales no ferrosos comunes tienen su propia combinación de propiedades que los hacen atractivos para una variedad de aplicaciones. En las siguientes nueve secciones se estudian aquellos que son los más importantes en lo comercial y tecnológico.

6.3.1 El aluminio y sus aleaciones

El aluminio y el magnesio son metales ligeros y por esta característica es frecuente que se les especifique en aplicaciones de ingeniería. Ambos elementos abundan en nuestro planeta, el aluminio en la tierra y el magnesio en el mar, aunque ninguno se extrae con facilidad de su estado natural.

En la tabla 6.1*b*) se enlistan las propiedades y otros datos del aluminio. Entre los metales principales es un recién llegado relativamente hablando, pues data apenas de fines del siglo XIX (véase la nota histórica 6.2). El estudio en esta sección incluye lo siguiente: 1) una descripción breve de la forma en que se produce el aluminio, y 2) un análisis de las propiedades y sistema de nomenclatura para el metal y sus aleaciones.

Nota histórica 6.2 *Aluminio*

En 1807, el químico inglés Humphrey Davy, en la creencia de que el mineral ***alúmina*** (Al_2O_3) tenía una base metálica, trató de extraer el metal. No tuvo éxito, pero, de cualquier modo, estaba convencido lo suficiente como para dar al metal el nombre de ***alumium***, el que después cambió por ***aluminio***. En 1825, el físicoquímico danés Hans Orsted finalmente tuvo éxito en separar el metal. Observó que "parecía estaño". En 1845, el físico alemán Friedrich Wohler fue el primero en determinar la gravedad específica, ductilidad y varias otras propiedades del aluminio.

El proceso electrolítico moderno para producir aluminio se basa en el trabajo concurrente pero independiente de Charles Hall, en Estados Unidos, y de Paul Heroult, en Francia, alrededor de 1886. En 1888, Hall y un grupo de empresarios iniciaron la empresa Pittsburgh Reduction Co. Ese mismo año se produjo el primer lingote de aluminio con el proceso de fusión electrolítica. La demanda de aluminio creció. La necesidad de cantidades grandes de electricidad en el proceso de producción llevó a la compañía a reubicarse en las cataratas del Niágara, en 1895, donde se disponía de energía hidroeléctrica a costo muy bajo. En 1907, la compañía cambió su nombre por el de Aluminum Company of America (Alcoa). Fue el único productor de aluminio en Estados Unidos hasta la Segunda Guerra Mundial.

Producción de aluminio El mineral principal de aluminio es la ***bauxita***, que consiste por mucho en óxido de aluminio hidratado (Al_2O_3-H_2O) y otros óxidos. La extracción del aluminio a partir de la bauxita se resume en tres pasos: 1) lavado y trituración del mineral

TABLA 6.7*a*) Nomenclatura de aleaciones de aluminio forjado y fundido.

Grupo de aleación	Código para forjado	Código para fundido
Aluminio, pureza de 99.0% o mayor	1XXX	1XX.X
Aleaciones de aluminio, por elemento(s) principal(es)		
Cobre	2XXX	2XX.X
Manganeso	3XXX	
Silicio + cobre o magnesio		3XX.X
Silicio	4XXX	4XX.X
Magnesio	5XXX	5XX.X
Magnesio y silicio	6XXX	
Zinc	7XXX	7XX.X
Estaño		8XX.X
Otros	8XXX	9XX.X

para obtener polvos finos; 2) proceso Bayer, en el que la bauxita se convierte en alúmina pura (Al_2O_3); y 3) electrólisis, en el que la alúmina se separa en aluminio y oxígeno gaseoso (O_2). El ***proceso Bayer***, llamado así en honor del químico alemán que lo creó, involucra una solución de polvo de bauxita en sosa cáustica acuosa (NaOH) a presión, seguida de precipitación de Al_2O_3 puro de la solución. La alúmina es importante en el comercio por sí misma, como material cerámico de uso en la ingeniería (véase el capítulo 7).

La ***electrólisis*** para separar el Al_2O_3 en sus elementos constitutivos requiere de disolver el precipitado en un baño de fundición de criolita (Na_3AlF_6) y sujetar la solución a una corriente directa entre las placas de un horno electrolítico. El electrólito se disocia para formar aluminio en el cátodo y oxígeno gaseoso en el ánodo.

Propiedades y esquema de nomenclatura El aluminio tiene mucha conductividad eléctrica y térmica, y su resistencia a la corrosión es excelente debido a la formación de una película superficial de óxido, delgada y dura. Es un metal muy dúctil y es notable la capacidad que tiene para adquirir la forma deseada. El aluminio puro tiene resistencia relativamente baja, pero se puede alear y tratar térmicamente para competir con ciertos aceros, en especial cuando el peso es una consideración importante.

El sistema de nomenclatura para el aluminio es un código numérico de cuatro dígitos. El sistema tiene dos partes, una para el aluminio forjado y otra para los aluminios fundidos. La diferencia es que para estos últimos se emplea un punto decimal después del tercer dígito. En la tabla 6.7*a*) se presentan las designaciones.

Debido a que en las propiedades de las aleaciones de aluminio influyen mucho el endurecimiento por trabajo y el tratamiento térmico, además del código de composición, debe designarse el templado (tratamiento para dar resistencia, si lo hubiera). En la tabla 6.7*b*) se presentan las designaciones principales de templado. Esta designación se agrega al número precedente de cuatro dígitos, separado por un símbolo como superíndice, para indicar el tratamiento o la ausencia de él; por ejemplo, 1 060 °F. Por supuesto, los tratamientos de templado que especifican endurecimiento por deformación no se aplican a las aleaciones fundidas. En la tabla 6.8 se dan algunos ejemplos de las diferencias notables en las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio que resultan de los distintos tratamientos.

6.3.2 El magnesio y sus aleaciones

El magnesio (Mg) es el más ligero de los metales estructurales. Su gravedad específica y otros datos básicos se presentan en la tabla 6.1*c*). El magnesio y sus aleaciones se encuentran disponibles tanto en forma forjada como fundida. Es relativamente fácil de maquinar. Sin embargo, en todo procesamiento del magnesio, las partículas pequeñas del metal (tales como astillas metálicas pequeñas procedentes del corte) se oxidan con rapidez, por lo que debe tenerse cuidado para evitar el peligro de incendio.

TABLA 6.7*b*) Nomenclatura del templado para aleaciones de aluminio.

Templado	Descripción
F	Como se fabrica, sin tratamiento especial.
H	Endurecido por deformación (aluminios forjados). La H va seguida de dos dígitos, el primero de los cuales indica un tratamiento térmico, si lo hubiera; y el segundo, el grado de endurecimiento por trabajo restante; por ejemplo: H1X No hubo tratamiento térmico después del endurecimiento por deformación, y X = 1 a 9, que indica el grado de endurecimiento por trabajo. H2X Recocido parcialmente, y X = grado de endurecimiento por trabajo remanente en el producto. H3X Estabilizado, y X = grado de endurecimiento por trabajo remanente. ***Estabilizado*** significa calentar ligeramente por arriba de la temperatura de uso que se prevé.
O	Recocido para liberar el endurecimiento por deformación y mejorar la ductilidad; reduce la resistencia a su nivel mínimo.
T	Tratamiento térmico para producir templados estables diferentes de F, H u O. Va seguido de un dígito para indicar un tratamiento específico; por ejemplo: T1 = enfriado a partir de una temperatura elevada, envejecido en forma natural. T2 = enfriado desde una temperatura elevada, trabajado en frío, envejecido en forma natural. T3 = solución tratada térmicamente, trabajada en frío, envejecida de modo natural. T4 = solución tratada térmicamente y envejecida naturalmente. T5 = enfriado desde una temperatura alta, envejecido en forma artificial. T6 = solución tratada térmicamente y envejecida en forma artificial. T7 = solución tratada térmicamente y sobrenvejecida o estabilizada. T8 = solución tratada térmicamente, trabajada en frío, envejecida de modo artificial. T9 = solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío. T10 = enfriada desde una temperatura elevada, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
W	Solución con tratamiento térmico, aplicada a aleaciones que se endurecen por el envejecimiento en su uso; es un templado inestable.

TABLA 6.8 Composiciones y propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio seleccionadas.

	Composición normal, %[a]							Resistencia a la tensión		
Código	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Templado	MPa	lb/in^2	Elongación
1050	99.5		0.4			0.3	O	76	11 000	39
							H18	159	23 000	7
1100	99.0		0.6			0.3	O	90	13 000	40
							H18	165	24 000	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	27 000	20
							T3	485	70 000	18
3004	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	26 000	22
							H36	260	38 000	7
4043	93.5	0.3	0.8			5.2	O	130	19 000	25
							H18	285	41 000	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18 000	18
							H38	200	29 000	3
6063	98.5		0.3	0.7		0.4	O	90	13 000	25
							T4	172	25 000	20

Recopilado a partir de la referencia [10].

[a] Además de los elementos que se enlistan, la aleación puede contener indicios de otros elementos tales como el cobre, magnesio, manganeso, vanadio y zinc.

TABLA 6.1 (*continuación*) *c*) Magnesio.

Símbolo:	Mg	Se extrae de:	$MgCl_2$ del agua marina, por electrólisis.
Número atómico:	12	Elementos de aleación:	Véase la tabla 6.9.
Gravedad específica:	1.74	Aplicaciones comunes:	Aeroespacial, misiles, bicicletas, sierras de cadena domésticas, equipajes y otras aplicaciones en las que el peso ligero es un requerimiento principal.
Estructura cristalina:	HCP		
Temperatura de fusión:	650 °C (1 202 °F)		
Módulo de elasticidad:	48 000 MPa (7×10^6 lb/in^2)		

TABLA 6.9 Letras del código para identificar los elementos en las aleaciones de magnesio.

A	aluminio (Al)	H	torio (Th)	M	manganeso (Mn)	Q	plata (Ag)	T	estaño (Sn)
E	metales de las tierras raras	K	zirconio (Tr)	P	plomo (Pb)	S	silicio (Si)	Z	zinc (Zn)

Producción del magnesio El agua de mar contiene alrededor de 0.13% de $MgCl_2$ y es la fuente de la mayor parte del magnesio que se produce en forma comercial. Para extraerlo, se mezcla una cantidad de agua marina con una lechada de cal, es decir, hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$). La reacción resultante precipita el hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) que se asienta y se retira como pasta aguada. Después, se filtra esta pasta aguada a fin de incrementar el contenido de $Mg(OH)_2$ para luego mezclarlo con ácido clorhídrico (HCl), que reacciona con el hidróxido para formar un concentrado de $MgCl_2$, mucho más concentrado que el del agua marina original. Se utiliza electrólisis para descomponer la sal en magnesio (Mg) y cloro gaseoso (Cl_2). Después se funde el magnesio en lingotes para su procesamiento posterior. El cloro se recicla para formar más $MgCl_2$.

Propiedades y esquema de nomenclatura Como metal puro, el magnesio es relativamente suave y carece de la resistencia suficiente para la mayor parte de las aplicaciones de la ingeniería. Sin embargo, se puede alear y tratar térmicamente para que alcance resistencias comparables a las de las aleaciones del aluminio. En particular, su relación resistencia-peso es una ventaja en los aviones y componentes de misiles.

El esquema de nomenclatura del magnesio usa un código alfanumérico de tres a cinco caracteres. Los primeros dos son letras que identifican los elementos principales de la aleación (pueden especificarse hasta dos elementos en el código, en orden decreciente de porcentaje, o en forma alfabética si los porcentajes son iguales). En la tabla 6.9 se enlistan dichas letras del código. Las letras van seguidas de un número de dos dígitos que indican, respectivamente, las cantidades de dos ingredientes de aleación al porcentaje más cercano. Finalmente, el último símbolo es una letra que indica cierta variación en la composición, o tan sólo el orden cronológico en el que se estandarizó para su disponibilidad comercial. Las aleaciones de magnesio también requieren la especificación del templado, y para ellas se emplea el mismo esquema básico que para el aluminio que se presentó en la tabla 6.7*b*).

En la tabla 6.10 se dan algunos ejemplos de aleaciones de magnesio, que ilustran el esquema de nomenclatura e indican su resistencia a la tensión y ductilidad.

6.3.3 El cobre y sus aleaciones

El cobre (Cu) es uno de los metales más antiguos que se conocen (véase la nota histórica 6.3). Los datos básicos del elemento cobre se presentan en la tabla 6.1*d*).

TABLA 6.10 Composiciones y propiedades mecánicas de aleaciones de magnesio seleccionadas.

	Composición normal, %							Resistencia a la tensión		
Código	Mg	Al	Mn	Si	Zn	Otro	Proceso	MPa	lb/in^2	Elongación
AZ10A	98.0	1.3	0.2	0.1	0.4		Trabajado	240	35 000	10
AZ80A	91.0	8.5			0.5		Forjado	330	48 000	11
HM31A	95.8		1.2			3.0 Th	Trabajado	283	41 000	10
ZK21A	97.1				2.3	6 Zr	Trabajado	260	38 000	4
AM60	92.8	6.0	0.1	0.5	0.2	0.3 Cu	Fundido	220	32 000	6
AZ63A	91.0	6.0			3.0		Fundido	200	29 000	6

Recopilado a partir de la referencia [10].

Nota histórica 6.3 Cobre

El cobre fue uno de los primeros metales que usaron las culturas humanas (el oro fue el otro). Es probable que el descubrimiento del metal ocurriera alrededor de 6000 a.C. En esa época, el cobre se encontró en estado metálico libre. Los antiguos pueblos fabricaron implementos y armas por medio del golpeo del metal (forja en frío). Al ser golpeado, el cobre se hacía más fuerte (endurecimiento por deformación); esto y su color rojo atractivo lo hacían valioso para las primeras civilizaciones.

Alrededor de 4000 a.C, se descubrió que el cobre podría fundirse para que adoptara formas útiles. Después se vio que mezclado con estaño podía fundirse y trabajarse con más facilidad que como metal puro. Esto llevó a que se extendiera el uso del bronce y posteriormente se diera el nombre de Edad de Bronce, a la época que transcurrió aproximadamente desde 2000 a.C. al periodo de Cristo.

Para los romanos antiguos, la isla de Chipre era casi la única fuente de cobre. Llamaban al metal ***aes cyprium*** (mineral de Chipre). Este nombre se abrevió a ***Cyprium*** y después a ***Cuprium***. De ahí deriva el símbolo químico Cu.

Producción de cobre En los tiempos antiguos, el cobre existía en la naturaleza como elemento libre. Hoy día, esos depósitos naturales son más difíciles de encontrar y el metal se extrae de minerales que en su mayoría son sulfuros, como la ***calcopirita*** ($CuFeS_2$). El mineral se tritura (véase la sección 17.1.1), se concentra por flotación y después se ***aparta*** (se derrite o funde, con frecuencia con una reacción química para separar el metal del mineral). El cobre resultante se denomina ***cobre ampollado***, que tiene una pureza de 98% y 99%. Se emplea electrólisis para obtener niveles de pureza más elevados apropiados para el uso comercial.

Propiedades y esquema de nomenclatura El cobre puro tiene un color rojizo o rosa distintivo, pero su propiedad de ingeniería más notable es su resistividad eléctrica baja, uno de los elementos con la más baja. Debido a esta propiedad, y a su abundancia relativa en la naturaleza, el cobre puro comercial se usa mucho como conductor eléctrico (aquí se debe decir que la conductividad del cobre disminuye de manera significativa si se agregan elementos de aleación). El Cu también es un conductor térmico excelente. El cobre es uno de los metales nobles (el oro y la plata también lo son), por lo que es resistente a la corrosión. Todas esas propiedades se combinan para que el cobre sea uno de los metales más importantes.

En contraparte, la resistencia y dureza del cobre son relativamente bajas, en especial si se toma en cuenta el peso. En consecuencia, para mejorar la resistencia (así como por otras razones), es frecuente que el cobre se alee. El ***bronce*** es una aleación de cobre y estaño (es común el 90% de Cu y 10% de Sn), que hoy se usa todavía a pesar de su antigüedad. Se han desarrollado aleaciones de bronce adicionales, con base en otros elementos distintos del estaño; entre éstos se hallan bronces de aluminio, y bronces de silicio. El ***latón*** es otra aleación de cobre que resulta familiar, compuesta de cobre y zinc (es común que contenga 65% de cobre y 35% de zinc). La aleación de cobre con mayor resistencia es la del berilio-cobre (con sólo el 2% de berilio). Puede tratarse térmicamente para obtener resistencias a la tensión de 1 035 MPa (150 000 lb/in^2). Las aleaciones de Be-Cu se usan para hacer resortes.

La nomenclatura de las aleaciones de cobre se basa en el Unified Numbering System for Metals and Alloys (UNS), que emplea un número de cinco dígitos precedido de la letra

TABLA 6.1 (*continuación*); *d*) Cobre.

Símbolo:	Cu	Mineral del que se extrae:	Varios: por ejemplo, calcopirita ($CuFeS_2$).
Número atómico:	29	Elementos de aleación:	Estaño (bronce), zinc (latón), aluminio, silicio, níquel y berilio.
Gravedad específica:	8.96	Aplicaciones comunes:	Conductores y componentes eléctricos, municiones (latón), vasijas y cacerolas, joyería, plomería, aplicaciones marinas, intercambiadores de calor, resortes (Be-Cu).
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	1 083 °C (1 981 °F)		
Módulo de elasticidad:	110 000 MPa (16 × 10^6 lb/in^2)		

TABLA 6.11 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de cobre seleccionadas.

	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		
Código	Cu	Be	Ni	Sn	Zn	MPa	lb/in^2	Elongación, %
C10100	99.99					235	34 000	45
C11000	99.95					220	32 000	45
C17000	98.0	1.7	[a]			500	70 000	45
C24000	80.0				20.0	290	42 000	52
C26000	70.0				30.0	300	44 000	68
C52100	92.0			8.0		380	55 000	70
C71500	70.0		30.0			380	55 000	45
C71500[b]	70.0		30.0			580	84 000	3

Recopilada a partir de la referencia [10].

[a] Cantidades pequeñas de Ni y Fe + 0.3 Co.

[b] Tratado térmicamente para dar más resistencia.

C (de cobre). Las aleaciones se procesan en formas fraguadas y fundidas, y el sistema de nomenclatura incluye ambas. En la tabla 6.11 se presentan algunas aleaciones de cobre con sus composiciones y propiedades mecánicas.

6.3.4 El níquel y sus aleaciones

En muchos aspectos, el níquel (Ni) es similar al hierro. Es magnético y su módulo de elasticidad es virtualmente el mismo que el del hierro y el acero. Sin embargo, es mucho más resistente a la corrosión y las propiedades de alta temperatura de sus aleaciones por lo general son superiores. Debido a sus características de resistencia a la corrosión, se usa mucho como elemento de aleación en el acero, como en los aceros inoxidables, y como metal de recubrimiento de otros metales, como el acero al carbono.

Producción de níquel El mineral de níquel más importante es la ***pentlandita*** ($(Ni, Fe)_9S_8$). Para extraer el níquel, primero se tritura el mineral mezclado con agua. A fin de separar los sulfuros de los demás minerales de la mena se utilizan técnicas de flotación. Después, se calienta el sulfuro de níquel para quemar algo del azufre, y luego se funde con el fin de eliminar hierro y silicio. Se refina más en un convertidor del tipo Bessemer para obtener sulfuro de níquel (NiS) de alta concentración. Después se aplica electrólisis para recuperar níquel de alta pureza a partir del compuesto. En ocasiones, los minerales de níquel se mezclan con otros de cobre, en cuyo caso la técnica de recuperación que se acaba de describir también produce cobre.

Aleaciones de níquel Las aleaciones de níquel tienen importancia comercial por sí mismas, y son notables por su resistencia a la corrosión y desempeño a altas temperaturas. En la tabla 6.12 se dan la composición, resistencia a la tensión y ductilidad de algunas aleaciones de níquel. Además, cierto número de superaleaciones se basan en el níquel (véase la sección 6.4).

TABLA 6.1 (*continuación*); *e*) Níquel.

Símbolo:	Ni	Mineral del que se extrae:	Pentlandita ($(Fe, Ni)_9S_8$).
Número atómico:	28	Elementos de aleación:	Cobre, cromo, hierro, aluminio.
Gravedad específica:	8.90	Aplicaciones comunes:	Ingrediente de las aleaciones del acero inoxidable, metal para recubrir acero, aplicaciones que requieren resistencia a las temperaturas elevadas y a la corrosión.
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	1 453 °C (2 647 °F)		
Módulo de elasticidad:	209 000 MPa (30×10^6 lb/in^2)		

TABLA 6.12 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de níquel.

	Composición normal, %							Resistencia a la tensión		
Código	Ni	Cr	Cu	Fe	Mn	Si	Otro	MPa	lb/in²	Elongación, %
270	99.9		[a]	[a]				345	50 000	50
200	99.0		0.2	0.3	0.2	0.2	C, S	462	67 000	47
400	66.8		30.0	2.5	0.2	0.5	C	550	80 000	40
600	74.0	16.0	0.5	8.0	1.0	0.5		655	95 000	40
230	52.8	22.0		3.0	0.4	0.4	[b]	860	125 000	47

Recopilada a partir de la referencia [10].

[a] Indicios.

[b] Otros ingredientes de aleación en grado 230: 5% Co, 2% Mo, 14% W, 0.3% Al, 0.1% C.

6.3.5 El titanio y sus aleaciones

El titanio (Ti) es abundante en la naturaleza, constituye cerca del 1% de la corteza terrestre (el 8% corresponde al aluminio, el que abunda más). La densidad del titanio está entre la del aluminio y la del hierro; éste y otros datos se presentan en la tabla 6.1*f*). En las últimas décadas su importancia ha crecido debido a sus aplicaciones aeroespaciales, en las que se aprovechan su peso ligero y razón resistencia-peso buena.

Producción de titanio Los minerales principales del titanio son el ***rutilo***, que está formado por 98% a 99% de TiO_2, y la ***ilmenita***, que es una combinación de FeO y TiO_2. El rutilo es preferible como mena debido a su mayor contenido de Ti. En la recuperación del metal a partir de sus minerales, el TiO_2 se convierte en tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) por medio de hacer reaccionar al compuesto con cloro gaseoso. A esto sigue una secuencia de etapas de destilación para eliminar las impurezas. Luego se reduce el $TiCl_4$ muy concentrado a titanio metálico, con una reacción con magnesio; esto se conoce como ***proceso Kroll***. Como agente reductor también puede usarse sodio. En cualquier caso, debe mantenerse una atmósfera inerte para impedir que el O_2, N_2 o H_2 contaminen al Ti por su gran afinidad con esos gases. El metal resultante se emplea para fundir lingotes del metal y sus aleaciones.

Propiedades del titanio El coeficiente de expansión térmica del titanio es relativamente bajo entre los metales. Es más rígido y fuerte que el aluminio, y a altas temperaturas conserva buena resistencia. El titanio puro es reactivo, lo que da problemas durante el procesamiento, en especial en estado fundido. Sin embargo, a temperatura ambiente forma una película delgada de óxido (TiO_2) adhesivo que recubre y proporciona una resistencia excelente contra la corrosión.

Estas propiedades han dado lugar a dos áreas principales de aplicación del titanio: 1) en estado puro comercial, el Ti se emplea para hacer componentes resistentes a la corrosión, tales como elementos marinos e implantes ortopédicos; y 2) las aleaciones de titanio se emplean como componentes de resistencia elevada en temperaturas que van de la del ambiente a 550 ºC (1 000 ºF), en especial en las que se aprovecha su excelente razón resis-

TABLA 6.1 (*continuación*); *f*) Titanio.

Símbolo:	Ti	Minerales principales de los que se extrae:	Rutilo (TiO_2) e ilmenita ($FeTiO_3$)
Número atómico:	22	Elementos de aleación:	Aluminio, estaño, vanadio, cobre y magnesio.
Gravedad específica:	4.51	Aplicaciones comunes:	Componentes de motores a reacción, otras aplicaciones aeroespaciales, implantes ortopédicos.
Estructura cristalina:	HCP		
Temperatura de fusión:	1 668 °C (3 034 °F)		
Módulo de elasticidad:	117 000 MPa (17×10^6 lb/in²)		

TABLA 6.13 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de titanio seleccionadas.

	Composición normal, %						Resistencia a la tensión		
Código[a]	Ti	Al	Cu	Fe	V	Otro	MPa	lb/in^2	Elongación, %
R50250	99.8			0.2			240	35 000	24
R56400	89.6	6.0		0.3	4.0	[b]	1 000	145 000	12
R54810	90.0	8.0			1.0	1 Mo,[b]	985	143 000	15
R56620	84.3	6.0	0.8	0.8	6.0	2 Sn,[b]	1 030	150 000	14

Recopilada a partir de las referencias [1] y [10].

[a] United Numbering System (UNS).

[b] Indicios de C, H, O.

tencia-peso. Estas aplicaciones recientes incluyen componentes de aeronaves y mísiles. Algunos de los elementos de aleación que se utilizan con el titanio incluyen aluminio, manganeso, estaño y vanadio. En la tabla 6.13 se presentan algunas composiciones y propiedades mecánicas de varias de sus aleaciones.

6.3.6 El zinc y sus aleaciones

En la tabla 6.1*g*) se enlistan los datos básicos del zinc. Su punto de fusión bajo lo hace atractivo como metal de fundición. También da protección contra la corrosión cuando se le usa como recubrimiento del acero o hierro; el ***acero galvanizado*** es acero recubierto con zinc.

Producción de zinc La blenda de zinc o ***esfalerita*** es el mineral principal del zinc; contiene sulfuro de zinc (ZnS). Otras menas importantes de zinc incluyen la ***smithsonita***, que es carbonato de zinc ($ZnCO_3$), y ***hemimorfato***, que es silicato hidroso de zinc ($Zn_4Si_2O_7OH$-H_2O).

La esfalerita debe concentrarse (o ***beneficiarse***, en el argot metalúrgico) debido a la cantidad tan pequeña de sulfuro de zinc que contiene. Esto se lleva a cabo por medio de triturar, en primer lugar, al mineral, luego se muele con agua en un molino de balines (véase la sección 17.1.1) para crear una pasta aguada. En presencia de un agente espumante, la pasta aguada se agita de modo que las partículas de mineral flotan en la superficie y se pueden retirar (se separan de los minerales pesados de la parte inferior). Después, el sulfuro de zinc más concentrado se calienta a 1 260 ºC (2 300 ºF), de modo que con la reacción se forma óxido de zinc (ZnO).

Hay varios procesos termoquímicos para recuperar el zinc de ese óxido, todos los cuales lo reducen por medio de carbono. El carbono se combina con el oxígeno del ZnO para formar CO y CO_2, lo que libera Zn en forma de vapor que se condensa para producir el metal deseado.

También se usa mucho un proceso electrolítico, responsable de alrededor de la mitad de la producción mundial de zinc. Dicho proceso también comienza con la preparación de ZnO, que se mezcla con ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4), seguido de electrólisis para separar la solución de sulfato de zinc ($ZnSO_4$) resultante y producir el metal puro.

TABLA 6.1 (*continuación*); *g*) Zinc.

Símbolo:	Zn	Módulo de elasticidad:	90 000 MPa (13 × 10^6 lb/in^2)[a].
Número atómico:	30	Mineral principal:	Esfalerita (ZnS).
Gravedad específica:	7.13	Elementos de aleación:	Aluminio, magnesio y cobre.
Estructura cristalina:	HCP	Aplicaciones comunes:	Acero y hierro galvanizados, fundición a troquel, elemento de aleación del latón.
Temperatura de fusión:	419 °C (786 °F)		

[a] El zinc se agrieta, por lo cual es difícil de medir su módulo de elasticidad; por esta razón, algunas tablas de propiedades omiten el valor de *E* para el zinc.

TABLA 6.14 Composición, resistencia a la tensión y aplicaciones de aleaciones de zinc seleccionadas.

	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		
Código[a]	Zn	Al	Cu	Mg	Fe	MPa	lb/in^2	Aplicación
Z33520	95.6	4.0	0.25	0.04	0.1	283	41 000	Fundición a troquel
Z35540	93.4	4.0	2.5	0.04	0.1	359	52 000	Fundición a troquel
Z35635	91.0	8.0	1.0	0.02	0.06	374	54 000	Aleación de fundición
Z35840	70.9	27.0	2.0	0.02	0.07	425	62 000	Aleación de fundición
Z45330	98.9		1.0	0.01		227	33 000	Aleación rolada

Recopilada a partir de la referencia [10].

[a] UNS – United Numbering System para metales.

Aleaciones y aplicaciones del zinc Las aleaciones del zinc se utilizan mucho en fundición a troquel para producir componentes en masa para las industrias automotriz y de aparatos. Otra aplicación mayor del zinc se tiene en el acero galvanizado. Como el nombre lo sugiere, se crea una celda galvánica en el acero galvanizado (el Zn es el ánodo y el acero el cátodo) que lo protege del ataque de la corrosión. Por último, el tercer uso importante del zinc es para producir latón. Como ya se dijo, esa aleación consiste en cobre y zinc, en la razón de 2/3 de Cu y 1/3 de Zn, aproximadamente. El latón se estudió en el análisis del cobre. En la tabla 6.14 se enlistan varias aleaciones de zinc, con datos sobre su composición, resistencia a la tensión y aplicaciones.

6.3.7 El plomo y el estaño

Es frecuente que el plomo (Pb) y el estaño (Sn) se estudien juntos debido a sus temperaturas de fusión bajas, y porque forman aleaciones para soldar que se emplean para hacer conexiones eléctricas. En la figura 6.3 se presenta el diagrama de fase del sistema estaño-plomo. Los datos básicos para ambos metales se enlistan en la tabla 6.1*h*).

El plomo es un metal denso con punto de fusión bajo; otras de sus propiedades son resistencia baja, poca dureza (la palabra "suave" es apropiada para describirlo), ductilidad alta y buena resistencia a la corrosión. Además de su empleo como soldadura, las aplicaciones del plomo y sus aleaciones incluyen las siguientes: tubos para plomería, rodamientos, municiones, metales tipográficos, protección contra rayos X, baterías de almacenamiento y amortiguamiento de vibraciones. También se utiliza mucho en productos químicos y pinturas. Los elementos de aleación principales para el plomo son estaño y antimonio.

El estaño tiene un punto de fusión aún más bajo que el del plomo; otras propiedades incluyen resistencia baja, poca dureza y ductilidad buena. El uso más temprano del estaño fue para hacer bronce, aleación que consistía en cobre y estaño creada alrededor de 3000 a.C. en Mesopotamia y Egipto. El bronce aún es una aleación de importancia comercial (aunque su importancia relativa ha declinado a lo largo de 5 000 años). Otros usos del estaño son para recubrir contenedores de lámina de acero ("latas de estaño") para almacenar comida y, por supuesto, como metal de soldadura.

TABLA 6.1 (*continuación*); *h*) Plomo y estaño.

	Plomo	Tin = Estaño
Símbolo:	Pb	Sn
Número atómico:	82	50
Gravedad específica:	11.35	7.30
Estructura cristalina:	FCC	HCP
Temperatura de fusión:	327 °C (621 °F)	232 °C (449 °F)
Módulo de elasticidad:	21 000 MPa (3×10^6 lb/in^2)	42 000 MPa (6×10^6 lb/in^2).
Mineral del que se extrae:	Galena (PbS)	Casiterita (SnO_2).
Elementos comunes de aleación:	Estaño, antimonio	Plomo, cobre
Aplicaciones comunes:	Véase el texto	Bronce, soldadura, latas de estaño.

TABLA 6.1 (*continuación*); *i*) metales refractarios.

	Molibdeno	Tungsteno
Símbolo:	Mo	W
Número atómico:	42	74
Gravedad específica:	10.2	19.3
Estructura cristalina:	BCC	BCC
Temperatura de fusión:	2 619 °C (4 730 °F)	3 400 °C (6 150 °F)
Módulo de elasticidad:	324 000 MPa (47 × 10^6 lb/in^2)	407 000 MPa (59 × 10^6 lb/in^2).
Minerales principales:	Molibdenita (MoS_2)	Scheelita ($CaWO_4$), wolframita (($Fe,Mn)WO_4$).
Elementos de aleación:	Véase el texto	[a]
Aplicaciones:	Véase el texto	Filamentos luminosos, piezas para motores a reacción, equipos para WC.

[a] El tungsteno se emplea como metal puro e ingrediente de aleaciones, pero pocas de éstas se basan en el W.

6.3.8 Metales refractarios

Los ***metales refractarios*** son aquellos capaces de soportar temperaturas elevadas. Los más importantes de este grupo son el molibdeno y el tungsteno; véase la tabla 6.1*i*). Otros metales refractarios son el columbio (Cb) y el tantalio (Ta). En general, estos metales y sus aleaciones pueden conservar una resistencia y dureza elevadas a temperaturas altas.

El molibdeno tiene un punto de fusión alto y es relativamente denso, rígido y fuerte. Se usa como metal puro (99.9% + % Mo) y como aleación. La aleación principal es TZM, que contiene cantidades pequeñas de titanio y zirconio (menos de 1% del total). El Mo y sus aleaciones poseen buena resistencia a alta temperatura, y a esto se deben sus tantas aplicaciones, que incluyen escudos contra el calor, elementos de calefacción, electrodos para soldadura por resistencia, troqueles para trabajos a altas temperaturas (por ejemplo, moldes para fundición a troquel) y piezas para motores de cohete y a reacción. Además de estas aplicaciones, el molibdeno también se emplea mucho como ingrediente de aleación de otros metales, como aceros y superaleaciones.

El tungsteno (W) tiene el punto de fusión más alto de todos los metales puros y es uno de los más densos. Es también el más rígido y duro de todos los metales puros. Su aplicación más conocida es el filamento de los focos incandescentes. Es común que las aplicaciones del tungsteno se caractericen por temperaturas de operación elevadas, tales como elementos para cohetes y motores a reacción, y electrodos de soldadura con arco. También se utiliza mucho como elemento de aleaciones de aceros para herramientas, resistentes al calor, y para el carburo de tungsteno (véase la sección 7.3.2).

Una desventaja grande tanto del Mo como del W es su propensión a oxidarse a temperaturas elevadas, por arriba de los 600 ºC (1 000 ºF), con lo que se perjudican sus propiedades de alta temperatura. Con el fin de superar esta deficiencia, deben emplearse recubrimientos protectores para estos metales en las aplicaciones de alta temperatura, o bien operar las piezas metálicas en un vacío. Por ejemplo, el filamento de tungsteno debe energizarse en el vacío interior de los focos.

6.3.9 Metales preciosos

Los metales preciosos, también llamados ***metales nobles*** debido a que son inactivos en cuanto a la química, incluyen el oro, platino y plata. Son metales atractivos, disponibles en cantidades limitadas, y a través de la historia de las civilizaciones se han empleado para acuñar monedas y respaldar el papel moneda. También se les usa mucho en joyería y aplicaciones similares que aprovechan su alto valor. Como grupo, los metales preciosos poseen densidad elevada, ductilidad buena, conductividad eléctrica alta, resistencia a la corrosión y temperaturas de fusión moderadas; véase la tabla 6.1*j*.

TABLA 6.1 (*continuación*); *j*) los metales preciosos.

	Oro	Platino	Plata
Símbolo:	Au	Pt	Ag
Número atómico:	79	78	47
Gravedad específica:	19.3	21.5	10.5
Estructura cristalina:	FCC	FCC	FCC
Temperatura de fusión:	1 063 °C (1 945 °F)	1 769 °C (3 216 °F)	961 °C (1 762 °F)
Minerales principales:	[a]	[a]	[a]
Elementos de aleación:	[b]	[b]	[b]
Aplicaciones:	Véase el texto	Véase el texto	Véase el texto

[a] Todos los metales preciosos se obtienen de depósitos en los que el metal puro está mezclado con otros minerales y metales. La plata también se extrae del mineral ***argentita*** (Ag_2S).

[b] Los metales preciosos por lo general no se alean.

El ***oro*** (Au) es uno de los metales más pesados; es suave y se le da forma con facilidad, y posee un color amarillo distintivo que le agrega valor. Además de la moneda y joyería, sus aplicaciones incluyen contactos eléctricos (debido a su buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión), trabajos dentales y recubrimiento de metales comunes para fines decorativos.

El ***platino*** (Pt) es el único metal (entre los comunes) cuya densidad es mayor que la del oro. Aunque no se usa tanto como éste, sus aplicaciones son diversas e incluyen la joyería, termopares, contactos eléctricos y equipo catalítico para el control de la contaminación de los automóviles.

La ***plata*** (Ag) es menos cara por unidad de peso que el oro o el platino. No obstante, su atractivo lustre "plateado" la hace un metal muy valioso para monedas, joyería y vajillas (que incluso adoptan el nombre del metal: "platería"). También se emplea como relleno en trabajos dentales. La plata tiene la conductividad eléctrica más elevada que cualquier metal, lo que la hace útil para contactos en aplicaciones electrónicas. Por último, debe mencionarse que el cloruro de plata y otros haluros del metal sensibles a la luz son la base de la fotografía.

6.4 SUPERALEACIONES

Las superaleaciones constituyen una categoría que encuadra a los metales ferrosos y no ferrosos. Algunas de ellas están basadas en el hierro, mientras otras lo están en el níquel y el cobalto. En realidad, muchas de las superaleaciones contienen cantidades sustanciales de tres o más metales, en lugar de un solo metal base más elementos de aleación. No obstante que el tonelaje de estos metales no es significativo en comparación con la mayoría de los demás metales que se han estudiado en este capítulo, tienen importancia comercial porque son muy caros; y también la tienen en cuanto a tecnología por lo que hacen.

Las ***superaleaciones*** son un grupo de aleaciones de alto rendimiento diseñadas para satisfacer requerimientos muy exigentes de fortaleza y resistencia a la degradación de su superficie (corrosión y oxidación) a varias temperaturas de uso. Para estos metales, la resistencia a la temperatura ambiente convencional no es un criterio importante, y la mayoría de ellos tiene propiedades al respecto que son buenas pero no extraordinarias. Lo que los distingue es su desempeño ante temperaturas elevadas; las propiedades mecánicas de interés son su resistencia a la tensión, dureza en caliente, resistencia al agrietamiento, y a la corrosión a temperaturas muy elevadas. Es frecuente que las temperaturas de operación estén en la cercanía de los 1 100 ºC (2 000 ºF). Estos metales se emplean mucho en sistemas de turbinas de gas, motores a reacción y de cohetes, turbinas de vapor, y plantas de energía nuclear, en los que la eficiencia de operación se incrementa con las temperaturas elevadas.

TABLA 6.15 Algunas composiciones comunes de las superaleaciones.

	Análisis químico, %[a]								
Superaleación	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	W	Nb	Ti	Otros[b]
Basada en el hierro									
Incoloy 802	46	32		21				< 1	< 1
Haynes 556	29	20	20	22	3				6
Basada en el níquel									
Incoloy 807	25	40	8	21		5			1
Inconel 718	18	53		19	3		5		1
Rene 41		55	11	19	1			3	2
Hastelloy S	1	67		16	15				1
Nimonic 75	3	76		20				< 1	< 1
Basada en el cobalto									
Stellite 6B	3	3	53	30	2	5			4
Haynes 188	3	22	39	22		14			
L-605		10	53	20		15			2

Recopilada a partir de la referencia [10].

[a] Composición dada al porcentaje más cercano; los porcentajes menores que 1 se indican como <1.

[b] Otros elementos incluyen: carbono, tungsteno, manganeso y silicio.

Por lo general, las superaleaciones se dividen en tres grupos, de acuerdo con su constituyente principal: hierro, níquel o cobalto.

- ***Aleaciones basadas en el hierro***. Como ingrediente principal tienen hierro, aunque en ciertos casos éste es menor de 50% de la composición total.
- ***Aleaciones basadas en el níquel***. Por lo general tienen mejor resistencia a las temperaturas altas que los aceros aleados. El níquel es el metal base. Los elementos principales de la aleación son el cromo y el cobalto; otros menores son el aluminio, titanio, molibdeno, niobio (Nb) y hierro. Algunos nombres familiares en este grupo son los de Inconel, Hastelloy y Rene 41.
- ***Aleaciones basadas en el cobalto***. Tienen al cobalto (alrededor del 40%) y cromo (quizá el 20%) como sus componentes principales. Otros elementos de la aleación incluyen al níquel, molibdeno y tungsteno.

En prácticamente todas las superaleaciones, inclusive las basadas en hierro, el darle resistencia se lleva a cabo mediante endurecimiento por precipitación. Las superaleaciones con base en el hierro no usan la formación de martensita para obtener su resistencia. En la tabla 6.15 se presentan las composiciones comunes para algunas de las aleaciones, en tanto que las propiedades de resistencia de ellas a temperaturas ambiente y elevada se muestran en la tabla 6.16.

6.5 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE METALES

Se dispone de una variedad amplia de procesos de manufactura para dar forma a los metales, mejorar sus propiedades, ensamblarlos y darles un acabado estético y protector.

Dar forma, ensamblar y procesos de acabado Los metales reciben su forma por medio de todos los procesos básicos, inclusive fundición, metalurgia de polvos, procesos de deformación y remoción de material. Además, las piezas metálicas se unen para formar ensambles por procesos tales como soldadura autógena, soldadura dura y soldadura suave, y sujeción mecánica. El tratamiento térmico se lleva a cabo para mejorar las propiedades. Y es común que los procesos de acabado se utilicen para mejorar la apariencia de las piezas metálicas o para dar protección contra la corrosión. Estas operaciones de acabado incluyen

TABLA 6.16 Propiedades de resistencia de las superaleaciones a temperatura ambiente y a 870 °C (1 600 °F).

	Resistencia a la tensión a temperatura ambiente		Resistencia a la tensión a 870 °C (1 600 °F)	
Superaleación	MPa	lb/in^2	MPa	lb/in^2
Basada en el hierro				
Incoloy 802	690	100 000	195	28 000
Haynes 556	815	118 000	330	48 000
Basada en el níquel				
Incoloy 807	655	95 000	220	32 000
Inconel 718	1 435	208 000	340	49 000
Rene 41	1 420	206 000	620	90 000
Hastelloy S	845	130 000	340	50 000
Nimonic 75	745	108 000	150	22 000
Basada en el cobalto				
Stellite 6B	1 010	146 000	385	56 000
Haynes 188	960	139 000	420	61 000
L-605	1 005	146 000	325	47 000

Recopilada a partir de la referencia [9].

la galvanoplastia y la pintura. En la tabla 6.17 se da un resumen de las muchas tecnologías de procesamiento que se describen en este libro.

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los metales Las propiedades mecánicas de los metales se alteran por medio de cierto número de técnicas. En el estudio de los distintos metales se ha hecho referencia a algunas de éstas. Los métodos para mejorar las propiedades mecánicas de los metales se agrupan en tres categorías: 1) aleación, 2) trabajo en frío, y 3) tratamiento térmico. La ***aleación*** se ha estudiado en todo el capítulo presente y es una técnica importante para dar resistencia a los metales. Al ***trabajo en frío*** se había hecho referencia como endurecimiento por deformación; su efecto es incrementar la resistencia y reducir la ductilidad. El grado en que estas propiedades mecánicas se ven afectadas depende de la cantidad de deformación y del exponente de endurecimiento por deformación en la curva de flujo, descrita por la ecuación (3.10). El trabajo en frío se utiliza tanto en metales puros como en aleaciones. Se realiza durante la deformación del elemento de trabajo a través de uno de los procesos para dar forma, por ejemplo rolado, forjado o extrusión. Entonces, el dar resistencia a los metales ocurre como subproducto de la operación de darles forma.

El ***tratamiento térmico*** se refiere a varios tipos de ciclos de calentamiento y enfriamiento que se ejecutan sobre un metal para cambiar en forma benéfica sus propiedades. Operan con la alteración de la microestructura básica del metal, que a su vez determina las propiedades mecánicas. Algunas de las operaciones de tratamiento térmico sólo son apli-

TABLA 6.17 Procesos de la manufactura de metales.

Proceso	Capítulo	Proceso	Capítulo
Fundición	10 y 11	Tratamiento térmico	27
Metalurgia de polvos	16	Limpieza y tratamientos superficiales	28
Procesos de formado:	18	Procesos de recubrimiento	29
Forjado	19	Procesos de ensamblado	
Laminado	20	Soldadura autógena	30 y 31
Procesos de remoción de material:		Soldadura dura y soldadura suave	32
Maquinado convencional	21 y 22	Ensamblado mecánico	33
Procesos abrasivos	25		
Procesos no tradicionales	26		

cables a cierto tipo de metales; por ejemplo, el tratamiento térmico del acero para formar martensita es algo especializado, toda vez que la martensita es exclusiva del acero. En el capítulo 27 se describen los tratamientos térmicos.

REFERENCIAS

[1] Bauccio, M. (ed.). ***ASM Metals Reference Book***, 3a. ed. ASM International, Materials Park, Ohio, 1993.

[2] Brick, R. M., Pense, A. W. y Gordon, R. B. ***Structure and Properties of Engineering Materials***, 4a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1977.

[3] Carnes, R. y Maddock, G., "Tool Steel Selection", ***Advanced Materials & Processes***, junio de 2004, pp. 37-40.

[4] ***Encyclopaedia Britannica***, vol. **21, *Macropaedia***. Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1990, en la sección: Industries, Extraction and Processing.

[5] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[6] Guy, A. G. y Hren, J. J. ***Elements of Physical Metallurgy***, 3a. ed. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1974.

[7] Hume-Rothery, W., Smallman, R. E. y Haworth, C. W. ***The Structure of Metals and Alloys***. Institute of Materials, Londres, Inglaterra, 1988.

[8] Lankford, W. T., Jr., Samways, N. L., Craven, R. F. y McGannon, H. E. ***The Making, Shaping, and Treating of Steel***, 10a. ed. United States Steel Co., Pittsburgh, Pennsylvania, 1985.

[9] ***Metals Handbook***, 10a. ed., vol. **1, *Properties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloys***. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[10] ***Metals Handbook***, 10a. ed., vol. **2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials,*** ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[11] Moore, C. y Marshall, R. I. ***Steelmaking***. The Institute for Metals, The Bourne Press, Ltd., Bournemouth, U. K., 1991.

[12] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. **3, *Materials, Finishing, and Coating***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

6.1. ¿Cuáles son algunas de las propiedades generales que distinguen a los metales de los materiales cerámicos y polímeros?

6.2. ¿Cuáles son los dos grupos principales de metales? Defínalos.

6.3. ¿Qué es una aleación?

6.4. ¿Qué es una solución sólida en el contexto de las aleaciones?

6.5. Diga la diferencia entre una solución sólida sustitucional y otra intersticial.

6.6. ¿Qué es una fase intermedia en el contexto de las aleaciones?

6.7. El sistema cobre-níquel es un sistema de aleación sencillo, como lo indica su diagrama de fase. ¿Por qué es tan sencillo?

6.8. ¿Cuál es el rango de los porcentajes de carbono que definen como acero a una aleación de hierro-carbono?

6.9. ¿Cuál es el rango de los porcentajes de carbono que definen como hierro colado a una aleación de hierro-carbono?

6.10. Identifique algunos de los elementos comunes de aleación, además del carbono, en los aceros de baja aleación.

6.11. ¿Cuáles son algunos de los mecanismos por medio de los que los elementos de aleación diferentes del carbono dan resistencia al acero?

6.12. ¿Cuál es el mecanismo por el que el carbono da resistencia al acero en ausencia de tratamiento térmico?

6.13. ¿Cuál es el elemento de aleación predominante en todos los aceros inoxidables?

6.14. ¿Por qué se llama así el acero inoxidable austenítico?

6.15. Además del alto contenido de carbono, ¿qué otros elementos de aleación son característicos del hierro colado?

6.16. Identifique algunas de las propiedades por las que es notable el aluminio.

6.17. ¿Cuáles son algunas de las propiedades más destacadas del magnesio?

6.18. ¿Cuál es la propiedad del cobre más importante para la ingeniería y que determina la mayor parte de sus aplicaciones?

6.19. ¿Cuáles elementos se alean por tradición con el cobre para formar *a*) bronce, y *b*) latón?

6.20. ¿Cuáles son las aplicaciones más importantes del níquel?

6.21. ¿Cuáles son las propiedades más notables del titanio?

6.22. Mencione algunas de las aplicaciones importantes del zinc.

6.23. ¿Cuál es la aleación importante que se forma con plomo y estaño?

6.24. *a*) Mencione los metales refractarios importantes. *b*) ¿Qué significa el término refractario?

6.25. *a*) Diga los cuatro metales nobles principales. *b*) ¿Por qué se les llama metales nobles?

6.26. Las superaleaciones se dividen en tres grupos básicos, de acuerdo con el metal base que se utiliza en la aleación. Mencione los grupos.

6.27. ¿Qué es lo que tienen de especial las superaleaciones? ¿Qué las distingue de las demás?

6.28. ¿Cuáles son los tres métodos básicos por medio de los cuales puede darse resistencia a los metales?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 20 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

6.1. ¿Cuáles de las propiedades o características siguientes son inconsistentes con los metales? (dos respuestas correctas): *a*) buena conductividad térmica, *b*) resistencia elevada, *c*) resistividad eléctrica alta, *d*) mucha rigidez, o *e*) enlace iónico.

6.2. ¿Cuál de los elementos metálicos es el más abundante en la Tierra?: *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) hierro, *d*) magnesio, *e*) silicio.

6.3. ¿Cuál de las siguientes es la fase predominante en el sistema de la aleación hierro-carbono para una composición con el 99% de Fe a temperatura ambiente?: *a*) austenita, *b*) cementita, *c*) delta, *d*) ferrita, o *e*) gama.

6.4. ¿Un acero con el 1.0% de carbono se conoce como cuál de los siguientes?: *a*) eutectoide, *b*) hipoeutectoide, *c*) hipereutectoide, o *d*) hierro forjado.

6.5. ¿Al incrementarse su contenido de carbono, la resistencia y dureza del acero, *a*) aumenta o *b*) disminuye?

6.6. ¿En el sistema del código AISI cómo se especifican los aceros simples al carbono?: *a*) 01XX, *b*) 10XX, *c*) 11XX, *d*) 12XX, o *e*) 30XX.

6.7. ¿Cuál de los elementos siguientes es el ingrediente de aleación más importante en el acero?: *a*) carbono, *b*) cromo, *c*) níquel, *d*) molibdeno, o *e*) vanadio.

6.8. ¿Cuál de los siguientes no es un ingrediente de aleación común del acero?: *a*) cromo, *b*) manganeso, *c*) níquel, *d*) vanadio, *e*) zinc.

6.9. Las aleaciones de solución sólida son el mecanismo principal para dar resistencia a los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA): ¿*a*) verdadero, o *b*) falso?

6.10. ¿Cuáles de los elementos de aleación siguientes se asocian más comúnmente con el acero inoxidable? (dos respuestas mejores): *a*) cromo, *b*) manganeso, *c*) molibdeno, *d*) níquel, y *e*) tungsteno.

6.11. ¿Cuál de los siguientes es el hierro colado de mayor importancia comercial?: *a*) hierro colado dúctil, *b*) hierro colado gris, *c*) hierro maleable, *d*) hierro colado blanco.

6.12. ¿Cuál de los metales que siguen tiene la densidad más baja?: *a*) aluminio, *b*) magnesio, *c*) estaño, o *d*) titanio.

6.13. ¿Cuál de los metales siguientes tiene la densidad más alta?: *a*) oro, *b*) plomo, *c*) platino, *d*) plata, o *e*) tungsteno.

6.14. ¿De cuál de los siguientes minerales se deriva el aluminio? *a*) alúmina, *b*) bauxita, *c*) cementita, *d*) hematita, o *e*) scheelita.

6.15. ¿Cuál de los metales que siguen es notable por su buena conductividad eléctrica? (hay una respuesta que es la mejor): *a*) cobre, *b*) oro, *c*) hierro, *d*) níquel, o *e*) tungsteno.

6.16. El latón tradicional es una aleación de cuál de los elementos metálicos siguientes (dos respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) oro, *d*) estaño, *e*) zinc.

6.17. ¿Cuál de los metales que siguen tiene el punto de fusión más bajo?: *a*) aluminio, *b*) plomo, *c*) magnesio, *d*) estaño, o *e*) zinc.

PROBLEMAS

6.1. Para el diagrama de fase cobre-níquel de la figura 6.2, encuentre las composiciones de las fases líquida y sólida para una composición nominal de 70% de Ni y 30% de Cu, a 1 371 °C (2 500 °F).

6.2. Para el problema anterior, utilice la regla de la palanca inversa para determinar las proporciones de las fases líquida y sólida presentes en la aleación.

6.3. Con el diagrama de fase plomo-estaño de la figura 6.3, determine las composiciones de las fases líquida y sólida para una composición nominal de 40% de Sn y 60% de Pb, a 204 ºC (400 ºF).

6.4. Para el problema anterior, utilice la regla de la palanca inversa para calcular las proporciones de las fases líquida y sólida presentes en la aleación.

6.5. Con el diagrama de fase plomo-estaño de la figura 6.3, determine las composiciones de las fases líquida y sólida para una composición nominal de 90% de Sn y 10% de Pb a 204 ºC (400 ºF).

6.6. Para el problema anterior, use la regla de la palanca inversa para encontrar las proporciones de las fases líquida y sólida presentes en la aleación.

6.7. En el diagrama de fase hierro-carburo de hierro de la figura 6.4, identifique la fase o fases presentes en las temperaturas siguientes y las composiciones nominales: *a*) 650 ºC (1 200 ºF) y 2% de Fe_3C, *b*) 760 ºC (1 400 ºF) y 2% de Fe_3C, y *c*) 1 095 °C (2 000 ºF) y 1% de Fe_3C.



CERÁMICOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Por lo general se considera que los metales son la clase más importante de materiales de la ingeniería. Sin embargo, es de interés observar que en realidad los materiales cerámicos son más abundantes y se utilizan más. En esta categoría se encuentran incluidos los productos de arcilla (por ejemplo, ladrillos y vajillas), vidrio, cemento y materiales cerámicos más modernos tales como el carburo de tungsteno y el nitruro cúbico de boro. Ésta es la clase de materiales que se estudia en este capítulo. También se incluye el análisis de varios elementos relacionados con los materiales cerámicos porque en ocasiones se les usa en aplicaciones similares. Estos elementos son el carbono, silicio y boro.

La importancia de los cerámicos como materiales de la ingeniería se deriva de su abundancia en la naturaleza y sus propiedades mecánicas y físicas, que son muy diferentes de las de los metales. Un material ***cerámico*** es un compuesto inorgánico que consiste en un metal (o semimetal) y uno o más no metales. La palabra ***cerámica*** proviene del griego ***keramos***, que significa arcilla de vasijas o trastos hechos de barro* cocido. Los ejemplos importantes de

* El término en inglés es ***clay***, arcilla. Los materiales arcillosos forman barro si se mojan, término que se emplea en el habla coloquial; en el mundo profesional se habla de arcillas; en el mundo de los artesanos se dice que el barro se cuece y la cerámica más artística o la porcelana se hornea. N. del T.

TABLA 7.1 Elementos más comunes de la corteza terrestre, con sus porcentajes aproximados.

Oxígeno	Silicio	Aluminio	Hierro	Calcio	Sodio	Potasio	Magnesio
50%	26%	7.6%	4.7%	3.5%	2.7%	2.6%	2.0%

Recopilada a partir de la referencia [5].

materiales importantes son el ***sílice***, o dióxido de silicio (SiO_2), ingrediente principal de la mayoría de los productos de vidrio, la ***alúmina***, u óxido de aluminio (Al_2O_3), que se utilizan en aplicaciones que van de abrasivos a huesos artificiales; y compuestos más complejos tales como el silicato de aluminio hidratado ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), conocido como ***caolinita***, ingrediente principal de la mayoría de los productos de arcilla. Los elementos de estos compuestos son los más comunes en la corteza terrestre, véase la tabla 7.1. El grupo incluye muchos compuestos adicionales, algunos de los cuales ocurren de manera natural, en tanto que otros son manufacturados.

Las propiedades generales que hacen a los materiales cerámicos útiles para los productos de ingeniería son la alta dureza, características buenas de aislamiento térmico y eléctrico, estabilidad química y temperaturas de fusión elevadas. Algunos cerámicos son traslúcidos; el ejemplo más claro es el vidrio para ventanas. También son frágiles y virtualmente no poseen ductilidad, lo que causa problemas tanto en su procesamiento como en su desempeño.

La importancia tecnológica y comercial de los materiales cerámicos queda demostrada por la variedad de productos y aplicaciones que se basan en esa clase de materiales. La lista incluye los siguientes:

- ***Productos de arcilla para la construcción,*** tales como ladrillos, tubos de arcilla y mosaicos para la construcción.
- ***Cerámicos refractarios,*** capaces de utilizarse en aplicaciones de alta temperatura tales como muros de hornos, crisoles y moldes.
- ***Cemento para concreto,*** se emplea para la construcción y carreteras (el concreto es un material compuesto, pero sus componentes son materiales cerámicos).
- ***Productos de línea blanca,*** incluyen vajillas, cerámica de gres, porcelana china, fina y otros artículos de mesa, con base en mezclas de arcilla y otros minerales.
- ***Vidrio,*** se utiliza en botellas, anteojos, lentes, cubiertas para ventanas y focos.
- ***Fibras de vidrio,*** para lana aislante térmica, plásticos reforzados (fibra de vidrio) y líneas de comunicación de fibras ópticas.
- ***Abrasivos,*** tales como óxido de aluminio y carburo de silicio.
- ***Herramientas para cortar materiales,*** que incluyen carburo de tungsteno, óxido de aluminio y nitruro de boro cúbico.
- ***Aislantes cerámicos,*** que se emplean en aplicaciones tales como componentes de transmisión eléctrica, encendedores y sustratos de chips para la microelectrónica.
- ***Cerámicos magnéticos,*** por ejemplo, en memorias de computadora.
- ***Combustibles nucleares,*** con base en óxido de uranio (UO_2).
- ***Biocerámicas,*** incluyen materiales que se usan para hacer dientes y huesos artificiales.

Para fines de organización, los materiales cerámicos se clasifican en tres tipos básicos: 1) ***cerámicos tradicionales***, silicatos que se emplean en productos de arcilla tales como vasijas y ladrillos, abrasivos comunes y cemento; 2) ***nuevos cerámicos***, creados recientemente con base en materiales que no son silicatos, tales como óxidos y carburos, y que por lo general poseen propiedades mecánicas o físicas que los hacen superiores o únicos si se les compara con los cerámicos tradicionales; y 3) ***vidrios***, con base sobre todo en sílice y que se distinguen de otros cerámicos por su estructura no cristalina. Además de los tres tipos básicos, se tienen ***vidrio-cerámicos***, vidrios que han sido transformados en una estructura cristalina grande por medio del tratamiento térmico.

7.1 ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS CERÁMICOS

Los compuestos cerámicos se caracterizan por tener enlaces covalentes e iónicos. Éstos son más fuertes que los enlaces metálicos de los metales, lo que ayuda a la dureza y rigidez altas pero ductilidad baja de los materiales cerámicos. Así como la presencia de electrones libres en el enlace metálico explica el porqué los metales son buenos conductores del calor y la electricidad, la presencia de electrones estrechamente empacados en las moléculas de las cerámicas explica el que estos materiales sean malos conductores. El enlace fuerte también da a estos materiales temperaturas de fusión altas, aunque en este caso algunas cerámicas se descomponen, en lugar de fundirse.

La mayoría de los materiales cerámicos adoptan estructura cristalina. Por lo general, sus estructuras son más complejas que las de la mayoría de los metales. Hay varias razones para ello. En primer lugar, las moléculas de los cerámicos consisten en general en átomos que son de tamaño significativamente distinto. En segundo, es frecuente que las cargas de los iones sean muy diferentes, como en muchas de los cerámicos comunes tales como el SiO_2 y el Al_2O_3. Estos dos factores tienden a forzar un arreglo físico más complicado de los átomos de la molécula y en la estructura cristalina resultante. Además, muchos materiales cerámicos consisten en más de dos elementos, tales como el ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), lo que también lleva a una complejidad mayor de la estructura molecular. Las cerámicas cristalinas son cristales aislados o sustancias policristalinas. En la segunda forma, más común, las propiedades físicas y mecánicas se ven afectadas por el tamaño del grano; los materiales de grano fino alcanzan resistencia y rigidez mayores.

Algunos materiales cerámicos tienden a adoptar una estructura amorfa o fase ***vítrea***, en vez de la forma cristalina. El ejemplo más familiar es, por supuesto, el vidrio. En cuanto a su química, la mayor parte de vidrios consisten en sílice fundido. Si se agregan otros materiales cerámicos vítreos tales como óxidos de aluminio, boro, calcio y magnesio, se obtienen variaciones de sus propiedades y colores. Además de estos vidrios puros, muchos cerámicos que tienen una estructura cristalina aprovechan la fase vítrea como aglutinante para su fase cristalina.

7.1.1 Propiedades mecánicas

En el capítulo 3 se presentaron las propiedades mecánicas básicas de los cerámicos. Los materiales cerámicos son rígidos y frágiles, muestran un comportamiento esfuerzo-deformación caracterizado como perfectamente elástico [véase la figura 3.6*a*)]. Como se ve en la tabla 7.2, los módulos de dureza y elasticidad de muchos materiales cerámicos nuevos son mayores que los de los metales (véanse las tablas 3.1, 3.6 y 3.7). La rigidez y dureza de los cerámicos y vidrios tradicionales son significativamente menores que las de los nuevos.

En teoría, la resistencia de los materiales cerámicos debiera ser más alta que la de los metales debido a su enlace atómico. Los tipos de enlace covalente e iónico son más fuertes que el metálico. Sin embargo, el enlace metálico tiene la ventaja de que permite el deslizamiento, mecanismo básico por el que los metales se deforman plásticamente cuando se les sujeta a esfuerzos elevados. Los enlaces en los materiales cerámicos son más rígidos y no permiten el deslizamiento ante esfuerzos. Su incapacidad para deslizarse hace mucho más difícil que los cerámicos absorban esfuerzos. Pero los materiales cerámicos contienen las mismas imperfecciones en su estructura cristalina que los metales: vacíos, intersticios, átomos desplazados y grietas microscópicas. Estos defectos internos tienden a concentrar los esfuerzos, en especial cuando se involucra una carga por tensión, flexión o impacto. Como resultado de estos factores, los cerámicos fallan con mucha mayor facilidad que los metales por fractura quebradiza si se les aplica una fuerza. Su resistencia a la tensión y tenacidad es relativamente baja. Asimismo, su desempeño es mucho menos predecible debido a la naturaleza aleatoria de las imperfecciones y la influencia de las variaciones en su procesamiento, en especial en los productos elaborados con cerámicos tradicionales.

Las debilidades que limitan la resistencia a la tensión de los materiales cerámicos casi no se presentan cuando se aplican esfuerzos compresivos. Los materiales cerámicos son

TABLA 7.2 Propiedades físicas y mecánicas seleccionadas de materiales cerámicos.

Material	Dureza (Vickers)	Módulo de elasticidad, E		Gravedad específica	Temperatura de fusión	
		Gpa	(lb/in^2)		°C	°F
Cerámicos tradicionales						
Ladrillos-barro cocido	N.A.	95	14×10^6	2.3	N.A.	N.A.
Cemento, Pórtland	N.A.	50	7×10^6	2.4	N.A.	N.A.
Carburo de silicio (SiC)	2 600 HV	460	68×10^6	3.2	2 700 [a]	4 892 [a]
Cerámicos nuevos						
Alúmina (Al_2O_3)	2 200 HV	345	50×10^6	3.8	2 054	3 729
Nitruro de boro cúbico (cBN)	6 000 HV	N.A.	N.A.	2.3	3 000 [a]	5 430 [a]
Carburo de titanio (TiC)	3 200 HV	300	45×10^6	4.9	3 250	5 880
Carburo de tungsteno (WC)	2 600 HV	700	100×10^6	15.6	2 870	5 198
Vidrio						
Vidrio de sílice (SiO_2)	500 HV	69	10×10^6	2.2	[b]	[b]

Recopilado a partir de las referencias [2], [3], [4], [5], [8], [9], y otras fuentes. Leyenda: N.A. = No disponible o no aplicable.

[a] Los materiales cerámicos se disocian químicamente o, en el caso del diamante y el grafito, se subliman (vaporizan), en lugar de fundirse.

[b] El vidrio, al no ser cristalino, no se funde al alcanzar un punto de fusión específico. En vez de ello, ante el aumento de temperatura desarrolla en forma gradual propiedades de fluido. Se vuelve líquido alrededor de 1 400 ºC (2 500 ºF).

sustancialmente más fuertes ante la compresión que ante la tensión. Para aplicaciones de ingeniería y estructurales, los diseñadores han aprendido a usar componentes cerámicos de modo que reciban por compresión en lugar de por tensión o flexión.

Se han creado varios métodos para dar resistencia a los materiales cerámicos, casi todos ellos tienen el enfoque fundamental de minimizar la superficie, los defectos internos y sus efectos. Estos métodos incluyen [6]: 1) hacer que los materiales de inicio sean más uniformes; 2) disminuir el tamaño del grano en los productos cerámicos policristalina; 3) minimizar la porosidad; 4) introducir esfuerzos superficiales a la compresión; por ejemplo, a través de aplicar el glaseado (vidriado) con expansiones térmicas bajas, de modo que el cuerpo del producto se contraiga después de arder más que el glaseado, lo que haría que éste actuara a la compresión; 5) utilizar fibras de refuerzo; y 6) tratamientos térmicos, tales como el templado de la alúmina a temperaturas que casi están en la región plástica, para darles resistencia.

7.1.2 Propiedades físicas

En la tabla 7.2 se presentan varias propiedades físicas de los cerámicos. La mayor parte de esos materiales son más ligeros que los metales y más pesados que los polímeros (véase la tabla 4.1). Las temperaturas de fusión son mayores que las de la mayoría de los metales, y algunos materiales cerámicos se descomponen en lugar de fundirse.

Las conductividades térmica y eléctrica de la mayoría de los cerámicos son menores que las de los metales; pero el rango de valores es mayor, lo que permite que ciertos cerámicos se utilicen como aislantes, en tanto que otras son conductores eléctricos. Sus coeficientes de expansión térmica son algo menores que los de los metales, pero los efectos son más dañinos en los cerámicos debido a su fragilidad. Los materiales cerámicos con conductividades térmicas bajas y expansiones térmicas relativamente altas, son susceptibles en especial a fallas de ese tipo, lo que resulta de gradientes de temperatura y cambios volumétricos significativos en regiones diferentes de la misma pieza. Los términos ***choque térmico*** y ***agrietamiento térmico*** se emplean en relación con esas fallas. Ciertos vidrios (por ejemplo los que contienen proporciones elevadas de SiO_2) y cerámicos vítreos son notables debido a su expansión térmica baja y son resistentes en particular a las fallas térmicas (un ejemplo familiar es el vidrio ***Pirex***).

7.2 CERÁMICOS TRADICIONALES

Estos materiales se basan en silicatos minerales, sílice y óxidos minerales. Los productos principales son el barro cocido (vasijas, vajillas, ladrillos y mosaicos), cemento y abrasivos naturales tales como la alúmina. Estos productos, y los procesos que se utilizan para fabricarlos, se remontan a miles de años (véase la nota histórica 7.1). El vidrio también es un material cerámico y con frecuencia se le incluye en el grupo de los materiales cerámicos tradicionales [3], [5]. En una sección posterior se estudia al vidrio debido a que su estructura vítrea o amorfa lo diferencia de los materiales cristalinos mencionados (el término ***vítreo*** significa vidrioso, o que posee características del vidrio).

Nota histórica 7.1 *Cerámicas antiguas*

Desde los tiempos de las primeras civilizaciones, la fabricación de cerámica ha sido un arte. Los arqueólogos examinan las vasijas antiguas y artefactos similares para estudiar las culturas del mundo antiguo. Las vasijas de cerámica no se corroen o desintegran con la edad, como sí lo hacen los artefactos de madera, metal o tela.

De algún modo, las primeras tribus descubrieron que la arcilla se transformaba en un material sólido y duro cuando se le colocaba cerca del fuego. En el Oriente Medio se han hallado artículos de barro cocido que datan de hace casi 10 000 años. En Egipto, alrededor de 4000 a.C., las vasijas de barro y productos similares formaban un comercio establecido.

Los avances mayores en la fabricación de vasijas tuvieron lugar en China, donde en una época tan temprana como 1400 a.C. se elaboraron por primera vez artículos de cerámica blanca. Hacia el siglo noveno, los chinos fabricaban objetos de porcelana, que se cocía a temperaturas más elevadas que el barro o la piedra, a fin de dar un vitrificado parcial a la mezcla más compleja de materias primas y hacer que el producto final tuviera una capa superficial translúcida. En Europa eran muy valoradas las vajillas de porcelana china; las denominaban "China". Contribuyeron mucho al comercio entre China y Europa e influyeron en el desarrollo de la cultura europea.

7.2.1 Materias primas

Los silicatos minerales, tales como las arcillas de distintas composiciones, y el sílice, como el cuarzo, se encuentran entre las sustancias más abundantes en la naturaleza, y constituyen las materias primas principales de los materiales cerámicos tradicionales. Estos compuestos sólidos cristalinos se formaron y mezclaron en la corteza terrestre a lo largo de millones de años, por medio de procesos geológicos complejos.

Las arcillas son las materias primas que se emplean más en los cerámicos. Consisten en partículas finas de silicatos de aluminio hidratados que se transforman en una sustancia plástica deformable y moldeable si se les mezcla con agua. Las arcillas más comunes se basan en el mineral ***caolinita*** ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). La composición de otros minerales de arcilla varía tanto en proporciones como en ingredientes básicos y contenido de otros elementos tales como magnesio, sodio y potasio.

Además de la plasticidad que adquiere cuando se mezcla con agua, una segunda característica de la arcilla que la hace muy útil, es que se convierte en un material fuerte y denso cuando se calienta a una temperatura suficientemente elevada. El tratamiento con calor se conoce como ***cocimiento***. Las temperaturas que son adecuadas para el cocimiento dependen de la composición de la arcilla. Así, puede darse forma a la arcilla cuando está húmeda y suave, y luego se cuece para obtener el producto final de cerámica dura.

El ***sílice*** (SiO_2) es otra materia prima importante para los cerámicos tradicionales. Es el componente principal del vidrio e ingrediente principal de otros productos de cerámica que incluyen vajillas, refractarios y abrasivos. El sílice existe en la naturaleza en varias formas, la más importante de ellas es el ***cuarzo***. La fuente principal del cuarzo es la ***arenisca***. La abundancia de arenisca y la facilidad relativa de su procesamiento significan

que el costo del sílice es bajo; también es duro y de química estable. A estas características se debe su uso tan extenso en los productos cerámicos. Por lo general se mezcla en proporciones distintas con arcilla y otros minerales a fin de obtener características apropiadas en el producto final. El ***feldespato*** es otro de los minerales que se emplea con frecuencia. El feldespato es cualquiera de varios minerales cristalinos que consisten en silicato de aluminio combinado con cualquiera de los elementos potasio, sodio, calcio o bario. Por ejemplo mezclado con potasio tiene la composición $KAlSi_3O_8$. Las mezclas de arcilla, sílice y feldespato se utilizan para fabricar vasijas, porcelana y otros artículos de comedor.

Otra materia prima importante para los cerámicos tradicionales es la ***alúmina***. La mayor parte de ésta se procesa a partir del mineral ***bauxita***, que es una mezcla impura de óxido de aluminio hidratado e hidróxido de aluminio más componentes similares de hierro y manganeso. La bauxita también es la mena principal para producir aluminio metálico. Una forma más pura pero menos común del Al_2O_3 es el mineral ***corundo***, que contiene alúmina en cantidades masivas. Las gemas llamadas zafiro y rubí son formas ligeramente impuras de cristales de corundo. La cerámica de alúmina se emplea como abrasivo en esmeriles y como ladrillos refractarios para hornos.

El ***carburo de silicio***, otra cerámica que se emplea mucho como abrasivo, no ocurre en forma de mineral. En vez de ello se produce con el calentamiento de mezclas de arena (fuente de silicio) y coque (carbón) a una temperatura de alrededor de 2 200 ºC (3 900 ºF), por lo que la reacción química resultante forma SiC y monóxido de carbono.

7.2.2 Productos cerámicos tradicionales

Los minerales estudiados antes son los ingredientes de una variedad de productos cerámicos. El estudio en este texto está organizado por categorías principales de los productos cerámicos tradicionales. En la tabla 7.3 se presenta un resumen de ellos y los materiales cerámicos de que están elaborados. El análisis se limita a los materiales que se usan en forma común con productos manufacturados, con lo que se omiten ciertos cerámicos de importancia comercial, como el cemento.

Vasijas y vajillas Esta categoría es una de las más antiguas, tiene miles de años de antigüedad; aún es una de las más importantes. Incluye productos de vajillas que toda la gente usa: vasijas de barro, cerámica de gres y porcelana. La materia prima de estos productos es la arcilla, por lo general combinada con otros minerales tales como sílice y feldespato. A la mezcla húmeda se le da forma y después se cuece para producir la pieza terminada.

La de ***barro*** es la menos refinada del grupo; incluye vasijas y productos similares hechos en tiempos antiguos. La de barro es relativamente porosa y con frecuencia glaseado. El ***glaseado*** involucra la aplicación de un recubrimiento superficial, por lo general una mezcla de óxidos tales como sílice y alúmina, para hacer que el producto sea menos permeable a la humedad y más atractivo a la vista. La ***cerámica de gres*** tiene menor porosidad que el barro, lo que resulta de un control más estrecho de los ingredientes y temperaturas

TABLA 7.3 Resumen de productos de cerámica tradicional.

Producto	Compuesto químico principal	Minerales y materias primas
Vasijas, vajillas	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, SiO_2, $KAlSi_3O_8$	Arcilla + sílice + feldespato
Porcelana	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, SiO_2, $KAlSi_3O_8$	Arcilla + sílice + feldespato
Ladrillos, mosaicos	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, SiO_2 más piedras finas	Arcilla + sílice + otros
Refractarios	Al_2O_3, SiO_2. Otros: MgO, CaO	Alúmina y sílice
Abrasivos: carburo de silicio	SiC	Sílice + coque
Abrasivos: óxido de aluminio	Al_2O_3	Bauxita o alúmina

de cocción más elevadas. La ***porcelana*** se hornea a temperaturas aún mayores, lo que da a las piezas terminadas una superficie translúcida característica de su alta calidad. La razón de esto es que gran parte del material cerámico ha sido convertido a la fase vítrea (se ha vitrificado), lo que lo hace transparente en comparación con la forma policristalina. La porcelana moderna casi es la misma que la de China, y se produce por medio de hornear los componentes, sobre todo arcilla, sílice y feldespato, a temperaturas aún más elevadas para obtener un material vítreo, denso y muy duro. La porcelana se utiliza en una variedad de productos que van del aislamiento eléctrico a los recubrimientos de bañeras.

Ladrillos y azulejos Los ladrillos para la construcción, tubería de arcilla, tejas no glaseadas para techos y mosaicos para drenajes, están hechos de distintas arcillas de bajo costo que contienen sílice y materiales arenosos que existen en depósitos naturales distribuidos con amplitud. Estos productos reciben su forma por presión (moldeo) y se cuecen a temperaturas relativamente bajas.

Refractarios Los refractarios cerámicos con frecuencia tienen la forma de ladrillos, son críticos en muchos procesos industriales que requieren de hornos y crisoles para calentar o fundir materiales. Las propiedades útiles de los materiales refractarios son su resistencia a las temperaturas elevadas, aislamiento térmico y resistencia a la reacción química con los materiales que se hornean (por lo general metales fundidos). Como se dijo, no es raro que la alúmina se utilice como cerámica refractaria, junto con el sílice. Otros materiales refractarios incluyen los óxidos de magnesio (MgO) y de calcio (CaO). Es frecuente que la superficie refractaria tenga dos capas, y que la exterior sea más porosa porque eso incrementa las propiedades de aislamiento.

Abrasivos Los cerámicos tradicionales que se emplean para hacer productos abrasivos tales como ruedas de esmeril y papel de lija son la ***alúmina*** y el ***carburo de silicio***. Aunque el SiC es más duro que aquélla (la dureza del SiC es 2 600 HV *versus* 2 200 HV de la alúmina), la mayoría de esmeriles se basan en Al_2O_3 debido a que da mejores resultados cuando se rebaja acero, que es el metal más usado. Las partículas abrasivas (granos de cerámica) se distribuyen en la rueda por medio de algún material aglutinante como laca, resinas de polímeros o caucho. El uso de abrasivos en la industria involucra la remoción de material, y la tecnología de los esmeriles y otros métodos de abrasión para retirar material se presenta en el capítulo 25.

7.3 NUEVOS MATERIALES CERÁMICOS

El término ***nuevos cerámicos*** se refiere a materiales cerámicos creados en forma sintética durante las décadas recientes, y por medio de mejoras en las técnicas de procesamiento que dan un control mayor sobre las estructuras y propiedades de los cerámicos. En general, los nuevos cerámicos se basan en compuestos distintos de silicato de aluminio en cantidades variables (el que constituye el grueso de los materiales cerámicos tradicionales). Los nuevos cerámicos son por lo general más sencillos en cuanto a su química que los tradicionales; por ejemplo, óxidos, carburos, nitruros y boruros. La línea divisoria entre los cerámicos tradicionales y los nuevos algunas veces no es muy clara, debido a que los primeros incluyen al óxido de aluminio y al carburo de silicio. En esos casos, la diferencia se basa más en los métodos de procesamiento que en la composición química.

Los nuevos cerámicos se organizan en categorías según su composición química: óxidos, carburos y nitruros, que se estudian en las secciones siguientes. En las referencias [2], [4] y [7] se hace un análisis más completo de los nuevos cerámicos.

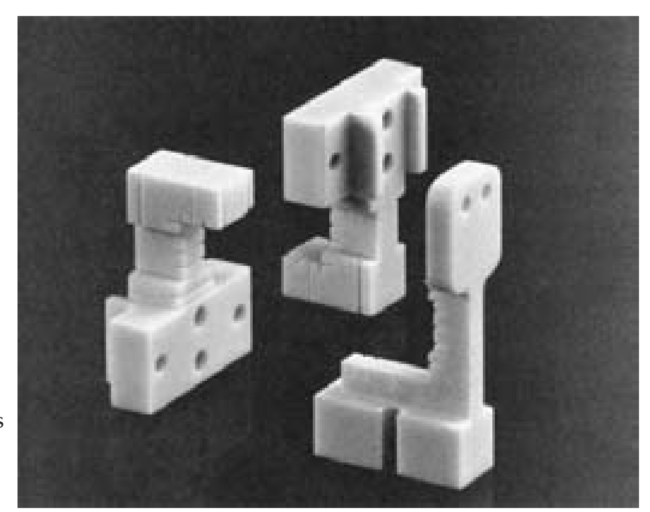


FIGURA 7.1 Componentes cerámicos de alúmina. (Fotografía por cortesía de Insaco Inc.)

7.3.1 Óxidos cerámicos

El óxido más importante de los nuevos cerámicos es la ***alúmina***. Aunque también se le estudia en el contexto de los cerámicos tradicionales, hoy día la alúmina se produce en forma sintética a partir de la bauxita, con un método de horno eléctrico. Por medio del control del tamaño de las partículas e impurezas, mejoras en los métodos de refinación y la mezcla de cantidades pequeñas de otros ingredientes cerámicos, se mejora en forma sustancial la resistencia e inflexibilidad de la alúmina, en comparación con su contraparte natural. La alúmina también tiene buena dureza en caliente, baja conductividad térmica y alta resistencia a la corrosión. Ésta es una combinación de propiedades que estimulan una variedad de aplicaciones, inclusive [12]: abrasivos (esmeriles de arena), biocerámicos (huesos y dientes artificiales), aislantes eléctricos, componentes electrónicos, ingredientes de aleación del vidrio, ladrillos refractarios, insertos para herramientas de corte (véase la sección 23.2.5), aislante de bujía y componentes de ingeniería (véase la figura 7.1).

7.3.2 Carburos

Los carburos cerámicos incluyen los carburos de silicio (SiC), tungsteno (WC), titanio (TiC), tantalio (TaC) y cromo (Cr_3C_2). El carburo de silicio ya se estudió. Aunque es un cerámico hecho por el hombre, los métodos para su producción se desarrollaron hace un siglo, y por ello generalmente se le incluye en el grupo de los cerámicos tradicionales. Además de su empleo como abrasivo, otras aplicaciones del SiC incluyen elementos de resistencia al calentamiento y aditivos para la fabricación de acero.

Se valora al WC, TiC y TaC, por su dureza y resistencia al desgaste en herramientas de corte y otras aplicaciones que requieren de esas propiedades. El ***carburo de tungsteno*** fue el primero que se creó (véase la nota histórica 7.2) y es el material más importante y de mayor uso de su grupo. El WC se produce en forma común por medio de carburar polvos de tungsteno que han sido reducidos a partir de minerales de tungsteno, tales como la ***wolframita*** ($FeMnWO_4$) y la scheelita ($CaWO_4$). El ***carburo de titanio*** se produce con la carburación de los minerales ***rutilo*** (TiO_2) o ***ilmenita*** ($FeTiO_3$). Y el ***carburo de tantalio*** se hace carburando ya sea polvos de tantalio o pentóxido de tantalio (Ta_2O_5) [10]. El ***carburo de cromo*** es más apropiado para aplicaciones en las que son importantes la estabilidad química y la resistencia a la oxidación. El Cr_3C_2 se prepara con la carburación del óxido de cromo (Cr_2O_3) como componente inicial. En todas estas reacciones la fuente usual de carbono es el negro de humo.

Nota histórica 7.2 *Carburo de tungsteno.*

El compuesto WC no se presenta en la naturaleza. Lo fabricó por primera vez el francés Henri Moissan a finales de la década de 1890. Sin embargo, la importancia tecnológica y comercial del suceso no se reconoció durante dos décadas.

A principios del siglo XX, el tungsteno se convirtió en un metal importante para los filamentos de las lámparas incandescentes. Se requería el estirado de alambres para producir los filamentos. Los troqueles de estirado de acero para herramientas de esa época eran insatisfactorios para obtener alambre de tungsteno debido al desgaste excesivo. Había necesidad de un material mucho más duro. Se sabía que el compuesto WC poseía dicha dureza. En 1914, en Alemania, H. Voigtlander y H. Lohmann crearon un proceso de fabricación para troqueles de estirado de carburo duro, con partes sinterizadas y prensadas a partir de polvos de carburo de tungsteno o carburo de molibdeno. Se da el crédito a Lohmann por ser quien hizo la primera producción comercial de carburos sinterizados.

El salto que condujo a la tecnología moderna de los carburos cementados se vincula con el trabajo de K. Schroter, en Alemania, en la primera mitad de la década de 1920. Utilizó polvos de WC mezclados con aproximadamente el 10% de un metal del grupo del hierro, y al final los colocaba sobre cobalto como el mejor aglutinante, y la mezcla se sinterizaba a una temperatura cercana al punto de fusión del metal. En 1926 se comercializó el material duro por primera vez en Alemania, como “Widia”. Las patentes de Schroter se asignaron a General Electric Company con la marca de “Carboloy”, que se produjo por vez primera en 1928 en Estados Unidos.

Widia y Carboloy se empleaban como materiales para herramientas de corte, con un contenido de cobalto de entre 4% y 13%. Eran eficaces para maquinar hierro fundido y muchos metales no ferrosos, pero no en el corte de acero. Cuando se maquinaba acero, las herramientas se desgastaban con rapidez por la formación de cráteres. Al comenzar la década de 1930, se crearon herramientas para cortar acero, a base de carburo con WC y TiC. En 1931, la compañía alemana Krupp comenzó la producción de Widia X, que tenía una composición de 84% de WC, 10% de TiC, y 6% de Co. Y en 1932 se introdujo a Estados Unidos el Carboloy Grado 831, que contenía 69% de WC, 21% de TiC y 10% de Co.

Excepto para el SiC, cada carburo de los que se estudian aquí debe combinarse con un aglutinante metálico como el cobalto o níquel, a fin de fabricar un producto sólido útil. En efecto, los polvos de carburo adheridos en una matriz metálica crean lo que se conoce como ***carburo cementado***, que es un material compuesto, se trata en específico de ***cermet*** (abreviación de ***cer***ámica y ***met***al). En la sección 9.2.1 se estudian los carburos cementados y otros cermets. Los carburos tienen poco valor para la ingeniería, excepto como constitutivos de un sistema compuesto.

7.3.3 Nitruros

Las nitruros importantes para los cerámicos son el de silicio (Si_3N_4), el de boro (BN) y el de titanio (TiN). Como grupo, las cerámicas de nitruros son duras y frágiles, y se funden a temperaturas altas (pero por lo general no tanto como las de los carburos). Lo normal es que sean aislantes eléctricos el TiN es una excepción.

El ***nitruro de silicio*** promete en aplicaciones estructurales de alta temperatura. El Si_3N_4 se oxida a alrededor de 1 200 ºC (2 125 ºF) y se descompone en cuanto a su química a los 1 900 ºC (3 400 ºF). Tiene baja expansión térmica, buena resistencia al choque y al agrietamiento térmicos, y resiste la corrosión de los metales no ferrosos fundidos. Estas propiedades hacen a este cerámico apto para aplicaciones en turbinas de gas, motores de cohete y crisoles para fundir.

El ***nitruro de boro*** existe en varias estructuras, en forma parecida al carbono. Las formas importantes del BN son 1) hexagonal, similar al grafito, y 2) cúbica, como el diamante; en realidad, su dureza es comparable a la del diamante. Esta última estructura se conoce con los nombres de ***nitruro de boro cúbico*** y ***borazon***, que se simboliza como cBN, y se produce por medio de calentar BN hexagonal en condiciones de presión muy elevada. Debido a su dureza extrema, las aplicaciones principales del cBN son en herramientas de corte (véase la sección 23.2.6) y los esmeriles (véase la sección 25.1.1). Es interesante que no compita con las herramientas de corte y esmeriles hechos de diamante. Éste es apropiado para maquinar y esmerilar lo que no sea acero, en tanto que el cBN es adecuado para trabajar el acero.

El ***nitruro de titanio*** tiene propiedades similares a las de los demás nitruros del grupo, excepto por su conductividad eléctrica, pues es conductor. El TiN tiene dureza elevada, buena resistencia al desgaste y bajo coeficiente de fricción con los metales ferrosos. Esta

combinación de propiedades hace que el TiN sea un material ideal como recubrimiento de superficies de herramientas de corte. El recubrimiento es de sólo alrededor de 0.006 mm (0.0003 in) de espesor, de modo que las cantidades de material que se utilizan para esta aplicación son bajas.

Un material cerámico nuevo relacionado con el grupo del nitruro, y también con los óxidos, es el cerámico de oxinitruro llamado ***sialon***. Consiste en los elementos silicio, aluminio, oxígeno y nitrógeno; y su nombre se deriva de ellos: Si-Al-O-N. Su composición química es variable, una común es $Si_4Al_2O_2N_6$. Las propiedades del sialon son similares a las del nitruro de silicio, pero resiste mejor que el Si_3N_4 la oxidación a temperaturas elevadas. Su aplicación principal es para herramientas de corte, pero sus propiedades lo hacen apropiado para otras aplicaciones de alta temperatura que se desarrollen en el futuro.

7.4 VIDRIO

El término ***vidrio*** es algo confuso porque describe tanto un estado de la materia como un tipo de cerámico. Como estado de la materia, se refiere a una estructura amorfa, no cristalina, de un material sólido. El estado vítreo ocurre en un material al que no se da tiempo suficiente para que al enfriarse a partir de la condición de fundido se forme la estructura cristalina. Se concluye que las tres categorías de los materiales de ingeniería (metales, cerámicos y polímeros) pueden adoptar el estado vítreo, aunque las circunstancias de los metales para ello son muy raras.

Como un tipo de cerámico, el ***vidrio*** es un compuesto inorgánico, no metálico (o mezcla de compuestos) que se enfría hasta adquirir una condición rígida sin cristalizar; es un cerámico que como material sólido está en estado vítreo. Éste es el material que se estudiará en esta sección, uno que se remonta a 4 500 años de antigüedad (véase la nota histórica 7.3).

Nota histórica 7.3 *Historia del vidrio*

Los especímenes más antiguos de vidrio datan de alrededor de 2500 a.C., son abalorios y otras formas sencillas encontradas en Mesopotamia y el antiguo Egipto. Se hicieron por medio de esculpir en forma meticulosa sólidos de vidrio, en lugar de moldear o dar forma a vidrio fundido. Fue hasta hace mil años que las culturas antiguas aprovecharon las propiedades fluidas del vidrio caliente, por medio de verterlo en capas sucesivas en un núcleo de arena hasta que el producto, un recipiente en forma de vaso, hubiera alcanzado espesor y rigidez suficientes. Esta técnica de vertido se empleaba alrededor del 200 a.C., cuando se inventó una herramienta simple que revolucionó el trabajo del vidrio: el soplete.

Es probable que el ***soplado del vidrio*** se realizara por vez primera en Babilonia y que después lo hicieran los romanos. Se hacía con el uso de un tubo de hierro de varios pies de largo, con una boquilla en un extremo y un aditamento para acomodar el vidrio fundido en el otro. Al final del tubo de hierro se colocaba una cantidad de vidrio caliente con la forma inicial y viscosidad que se requería, y luego un artesano soplaba para darle forma, ya fuera al aire o en una cavidad moldeadora. Se utilizaban otras herramientas sencillas que se agregaban al tubo o para darle una base al objeto.

Los romanos antiguos tenían gran habilidad en el uso de varios óxidos metálicos para dar color al vidrio. Su tecnología es evidente en los vitrales de catedrales e iglesias de la edad media en Italia y el resto de Europa. El arte de soplar vidrio aún se practica hoy día para ciertos artículos de consumo, y se emplean versiones automatizadas de soplado para la producción en masa de algunos productos tales como botellas y focos (véase el capítulo 12).

7.4.1 Química y propiedades del vidrio

El ingrediente principal en virtualmente todos los vidrios es el ***sílice*** (SiO_2), que se encuentra en forma común como cuarzo mineral en las areniscas y arenas sílicas. El cuarzo está presente en forma natural como sustancia cristalina, pero cuando se funde y luego se enfría,

TABLA 7.4 Composiciones comunes de productos de vidrio seleccionados.

	Composición química (en peso, al % más cercano)								
Producto	SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	PbO	B_2O_3	Otros
Vidrio de cal y sosa	71	14	13	2					
Vidrio para ventanas	72	15	8	1	4				
Vidrio para envases	72	13	10	2[a]	2	1			
Vidrio para focos	73	17	5	1	4				
Vidrio de laboratorio:									
Vycor	96			1				3	
Pyrex	81	4		2				13	
Vidrio E (fibras)	54	1	17	15	4			9	
Vidrio S (fibras)	64			26	10				
Vidrios ópticos:									
Vidrio al Boro	67	8				12		12	ZnO
Vidrio al Plomo	46	3				6	45		

Recopilado a partir de las referencias [3], [4], [9] y de otras fuentes.
[a] Incluyen Fe_2O_3 con Al_2O_3

forma sílice vítreo. El vidrio de sílice tiene un coeficiente de expansión térmica muy bajo, y por ello es muy resistente al choque térmico. Estas propiedades son ideales para aplicaciones de temperaturas elevadas; en consecuencia, el vidrio Pirex y otros para uso químico que están diseñados para calentarlos, se fabrican con proporciones elevadas de vidrio de sílice.

A fin de reducir el punto de fusión del vidrio para hacer más fácil su procesamiento y controlar sus propiedades, la composición de la mayoría de vidrios comerciales incluye otros óxidos además de sílice. Éste permanece como el componente principal en esa clase de productos, por lo general entre el 50% y el 75% de los productos químicos totales. La razón de que en esos compuestos se utilice tanto el SiO_2 es porque es el mejor ***formador de vidrio***. Se transforma de manera natural en estado vítreo cuando se enfría desde el líquido, en tanto que la mayoría de los materiales cerámicos se cristalizan al solidificarse. En la tabla 7.4 se enlistan las composiciones químicas frecuentes de ciertos vidrios comunes. Los ingredientes adicionales están contenidos en una solución sólida con SiO_2, y cada uno tiene una función: 1) actuar como fundente (facilita la fundición) durante el calentamiento; 2) incrementar la fluidez del vidrio fundido para su procesamiento; 3) retardar la ***desvitrificación***, es decir, la tendencia a cristalizar desde el estado vítreo; 4) reducir la expansión térmica del producto final; 5) mejorar la resistencia química contra el ataque de ácidos, sustancias básicas o agua; 6) agregar color al vidrio, y 7) alterar el índice de refracción para aplicaciones ópticas (por ejemplo, lentes).

7.4.2 Productos de vidrio

A continuación se da una lista de las categorías principales de productos de vidrio. Al estudiarlos, se analiza el papel que juegan los distintos ingredientes mencionados en la tabla 7.4.

Vidrio para ventanas En la tabla 7.4, este vidrio está representado por dos composiciones químicas: 1) vidrio de cal y sosa cáustica y 2) vidrio para ventanas. La fórmula de cal y sosa cáustica se remonta a la industria del soplado de vidrio del siglo XIX, y aun antes. Se fabricaba (incluso hoy) mezclando sosa (Na_2O) y cal (CaO) con sílice (SiO_2) como el ingrediente principal. La combinación de ingredientes que se agregan ha tenido una evolución empírica hasta lograr un balance entre evitar la cristalización durante el enfriamiento y lograr la estabilidad química del producto final. Durante esta evolución, el vidrio moderno para ventanas y las técnicas para fabricarlo han requerido pocos ajustes en cuanto a su composición y control más estrecho. Se agrega magnesio (MgO) para que ayude a reducir la desvitrificación.

Envases En tiempos pasados, se usaba la misma composición de cal y sosa cáustica para el vidrio soplado en forma manual a fin de fabricar botellas y otros envases. Los procesos modernos para dar forma a los envases de vidrio, enfrían éste con más rapidez que los métodos antiguos. Asimismo, hoy día se entiende mejor la importancia de la estabilidad química de los envases de vidrio. Los cambios resultantes en la composición tratan de optimizar las proporciones de cal (CaO) y sosa (Na_2O_3). La cal facilita la fluidez. También incrementa la desvitrificación, pero como el enfriamiento es más rápido, este efecto no es tan importante como lo era para las técnicas de procesamiento anteriores, con tasas de enfriamiento más lentas. La reducción de la sosa disminuye la inestabilidad química y la solubilidad del vidrio del envase.

Vidrio para focos El vidrio que se usa para hacer focos y otros artículos de vidrio delgado (por ejemplo, copas, adornos navideños) tiene contenido alto de sosa y bajo de cal; también contiene cantidades pequeñas de magnesio y alúmina. La química está dictada en mucho por la economía de los volúmenes grandes que implica la manufactura de focos. Las materias primas no son caras en lo absoluto y sí apropiadas para los hornos de fundición continua que se utilizan en el presente.

Vidrio de laboratorio Estos productos incluyen contenedores para productos químicos (por ejemplo, matraces, vasos de precipitados, tubería de vidrio). Este vidrio debe ser resistente al ataque químico y el choque térmico. Es apropiado el vidrio con alto contenido de sílice debido a su baja expansión térmica. Para esta clase de vidrio se utiliza el nombre comercial de "Vycor". Este producto es muy insoluble en agua y ácidos. Al agregarle óxido bórico también produce un vidrio con coeficiente de expansión térmica bajo, por lo que algunos vidrios para laboratorio contienen alrededor de 13% de B_2O_3. Para el vidrio de borosilicato creado por Corning Glass Works, se emplea el nombre comercial "Pyrex". Tanto Vycor como Pyrex están incluidos en la lista de ejemplos de esta categoría de productos.

Fibras de vidrio Éstas se manufacturan para numerosas aplicaciones importantes, inclusive plásticos de fibra de vidrio reforzada, lana aislante y fibra óptica. Las composiciones varían de acuerdo con la función. Las fibras de vidrio que se usan más para reforzar plásticos son las de vidrio E. Tiene un contenido alto de CaO y Al_2O_3, es económico y en forma de fibra posee buena resistencia a la tensión. Otro material de fibra de vidrio es el vidrio S, que tiene resistencia mayor pero no es tan económico como el vidrio E. En la tabla 7.4 se indican las composiciones.

La lana aislante de fibra de vidrio se manufactura a partir de vidrios regulares de sosa-cal-sílice. El producto de vidrio para fibra óptica consiste en un núcleo largo y continuo de vidrio con índice de refracción elevado rodeado por una envoltura de vidrio de refracción baja. El vidrio interno debe tener una transmitancia muy alta para la luz a fin de realizar comunicaciones a larga distancia.

Vidrios ópticos Las aplicaciones para estos vidrios incluyen lentes para anteojos e instrumentos ópticos tales como cámaras, microscopios y telescopios. Para llevar a cabo su función, los vidrios deben tener índices de refracción distintos, pero cada uno de ellos debe ser de composición homogénea. Los vidrios ópticos por lo general se dividen en vidrios al boro y al plomo. El ***vidrio al boro*** tiene un índice de refracción bajo, en tanto que el ***vidrio al plomo*** contiene óxido de plomo (PbO) que le da un índice de refracción alto.

7.4.3 Vidrios-cerámicos

Los ***vidrios-cerámicos*** son una clase de material cerámico que se produce por la conversión de vidrio en una estructura policristalina por medio de tratamiento de calor. La proporción de la fase cristalina en el producto final por lo común varía entre 90% y 98%, y el resto es material vítreo sin convertir. Por lo general, el tamaño del grano está entre 0.1 y 1.0 μm (4 y 40 μ-in), lo que es significativamente menor que el tamaño del grano de las cerámicas convencionales. Esta microestructura fina hace que los vidrios-cerámicos sean

TABLA 7.5 Varios sistemas de vidrio-cerámico.

Sistema de vidrio-cerámico	Composición frecuente (al % más cercano)						
	Li_2O	MgO	Na_2O	BaO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2
Li_2O-Al_2O_3-SiO_2	3				18	70	5
MgO-Al_2O_3-SiO_2		13			30	47	10
Na_2O-BaO-Al_2O_3-SiO_2			13	9	29	41	7

Recopilado a partir de las referencias [4], [5] y [9].

mucho más fuertes que los vidrios de los que se derivan. Asimismo, debido a su estructura cristalina, los vidrios-cerámicos son opacos (por lo general grises o blancos), y no claros.

La secuencia de procesamiento de los vidrios-cerámicos es la siguiente: 1) El primer paso incluye operaciones de calentamiento y formado que se emplean en el trabajo del vidrio (véase la sección 12.2) para crear la forma que se desea para el producto. Los métodos para dar forma al vidrio por lo general son más económicos que el prensado y el sinterizado para dar forma a los cerámicos tradicionales y nuevos a partir de polvos. 2) El producto se enfría. 3) Se vuelve a calentar el vidrio a una temperatura suficiente para ocasionar que se forme en todo el material una red densa de núcleos de cristales. Es esta densidad alta de los sitios de nucleación lo que inhibe el crecimiento de granos de cristales individuales, lo que en última instancia conduce al tamaño fino del grano del material del vidrio-cerámico. La clave para que ocurra la propensión a formar núcleos es la presencia de cantidades pequeñas de agentes nucleadores en la composición del vidrio. Los más comunes de éstos son el TiO_2, P_2O_5 y ZrO_2. 4) Una vez iniciada la nucleación, continúa el tratamiento térmico a una temperatura mayor para producir el crecimiento de las fases cristalinas.

En la tabla 7.5 se listan varios ejemplos de sistemas de vidrios-cerámicos y sus composiciones típicas. El de mayor importancia comercial es el sistema Li_2O-Al_2O_3-SiO_2; incluye el Corning Ware (Pyroceram), producto de Corning Glass Works que resulta familiar.

Las ventajas notables de los vidrio-cerámicos incluyen 1) la eficiencia de procesamiento en el estado vítreo, 2) control dimensional estrecho de la forma del producto final, y 3) buenas propiedades físicas y mecánicas. Éstas incluyen alta resistencia (mayor que la del vidrio), ausencia de porosidad, bajo coeficiente de expansión térmica y elevada resistencia al choque térmico. Estas propiedades dan como resultado aplicaciones para utensilios de cocina, intercambiadores de calor y misiles. Ciertos sistemas (por ejemplo, el de MgO-Al_2O_3-SiO_2) también se caracterizan por su resistencia eléctrica elevada, apropiada para aplicaciones eléctricas y electrónicas.

7.5 ALGUNOS ELEMENTOS IMPORTANTES RELACIONADOS CON LOS CERÁMICOS

En esta sección, se estudian varios elementos importantes para la ingeniería: carbono, silicio y boro. Estos materiales aparecerán algunas veces en capítulos posteriores. Aunque de acuerdo con la definición planteada aquí, no son materiales cerámicos, en ocasiones compiten en las aplicaciones con los materiales cerámicos. Y por sí mismos tienen aplicaciones importantes. En la tabla 7.6 aparecen los datos básicos de estos elementos.

7.5.1 Carbono

El carbono ocurre en dos formas alternativas de importancia en el comercio y la ingeniería: grafito y diamante. Compiten con los materiales cerámicos en varias aplicaciones: el grafito, en situaciones en las que son importantes las propiedades refractarias, y el diamante en aplicaciones industriales en las que la dureza es un factor crítico (como en las herramientas para cortar y esmerilar).

TABLA 7.6 Algunos datos y propiedades básicos del carbono, silicio y boro.

	Carbono	Silicio	Boro
Símbolo	C	Si	B
Número atómico	6	14	5
Gravedad específica	2.25	2.42	2.34
Temperatura de fusión	3 727 °C [a] (6 740 °F)	1 410 °C (2 570 °F)	2 030° C (3 686 °F)
Módulo de elasticidad, GPa (lb/in^2)	240[b] (35 × 10^6)[b] 1 035[c] (150 × 10^6)[c]	N.A.	393 (57 × 10^6)
Dureza (escala de Mohs)	1[b], 10[c]	7	9.3

[a] El carbono se sublima (vaporiza) en lugar de fundirse.
[b] Carbono en forma de grafito (se da el valor común).
[c] El carbono en forma de diamante.
N.A. = no disponible o no aplicable.

Grafito El grafito tiene un contenido alto de carbono cristalino en forma de capas. En enlace de los átomos de las capas es covalente y por tanto fuerte, pero las capas paralelas se enlazan una con otra por medio de fuerzas débiles de Van der Waals. Esta estructura hace que el grafito sea anisotrópico; su resistencia y otras propiedades varían de manera significativa con la dirección. Esto explica el porqué se emplea grafito tanto como lubricante y como fibra en los materiales compuestos avanzados. En forma de polvo, el grafito posee características de poca fricción debido a la facilidad con que se separa en capas; en esa forma, el grafito es valioso como lubricante. En forma de fibra, está orientado en la dirección del plano hexagonal y produce un material filamentoso con resistencia y módulo de elasticidad muy grandes. Estas fibras de grafito se emplean en compuestos estructurales que van de raquetas de tenis a componentes de aviones de combate.

A altas temperaturas, el grafito presenta ciertas propiedades que son tanto útiles como inusuales. Es resistente al choque térmico, y su resistencia en realidad se incrementa con la temperatura. Su resistencia a la tensión a temperatura ambiente es cerca de 100 MPa (15 000 lb/in^2), pero a 2 500 ºC (4 530 ºF) se incrementa al doble [4]. La densidad teórica del carbono es de 2.22 gm/cm^3, pero la densidad aparente del grafito en bloque es menor debido a la porosidad (alrededor de 1.7 gm/cm^3). Ésta aumenta con la compactación y el calor. Tiene conductividad eléctrica, pero no tan alta como la de la mayoría de metales. Una desventaja del grafito es que se oxida en el aire por arriba de los 500 ºC (900 ºF). En una atmósfera reductora eso puede llegar a ocurrir a 3 000 ºC (5 400 ºF), no demasiado debajo de su punto de sublimación, que está a 3 727 ºC (6 740 ºF).

La forma tradicional del grafito es la policristalina con cierta cantidad de carbono amorfo mezclado. Es frecuente que los cristales de grafito se orienten (hasta cierto grado) a procesos de producción comercial que aprovechan sus propiedades en la dirección preferente para la aplicación. Asimismo, la resistencia se mejora por medio de reducir el tamaño del grano (en forma similar a la cerámica). En esta forma, el grafito se emplea para crisoles y otras aplicaciones refractarias, electrodos, elementos de calentamiento por resistencia, materiales antifricción, y fibras de materiales compuestos. Así, el grafito es un material muy versátil. Como polvo es lubricante. En su forma sólida tradicional es refractario. Y cuando se le da forma de fibras, es un material estructural de resistencia elevada.

Diamante El diamante es carbono que posee estructura cristalina cúbica con enlace covalente entre sus átomos, como se ilustra en la figura 2.5*b*). Esta estructura es tridimensional, en lugar de tener capas como el carbono en forma de grafito, y esto se relaciona con la dureza muy alta del diamante. Los diamantes naturales de un solo cristal (provenientes de minas en Sudáfrica) tienen una dureza de 10 000 HV, mientras que la de los diamantes industriales (estructura policristalina) es de alrededor de 7 000 HV. La gran dureza se aprovecha en la mayoría de las aplicaciones de los diamantes industriales.

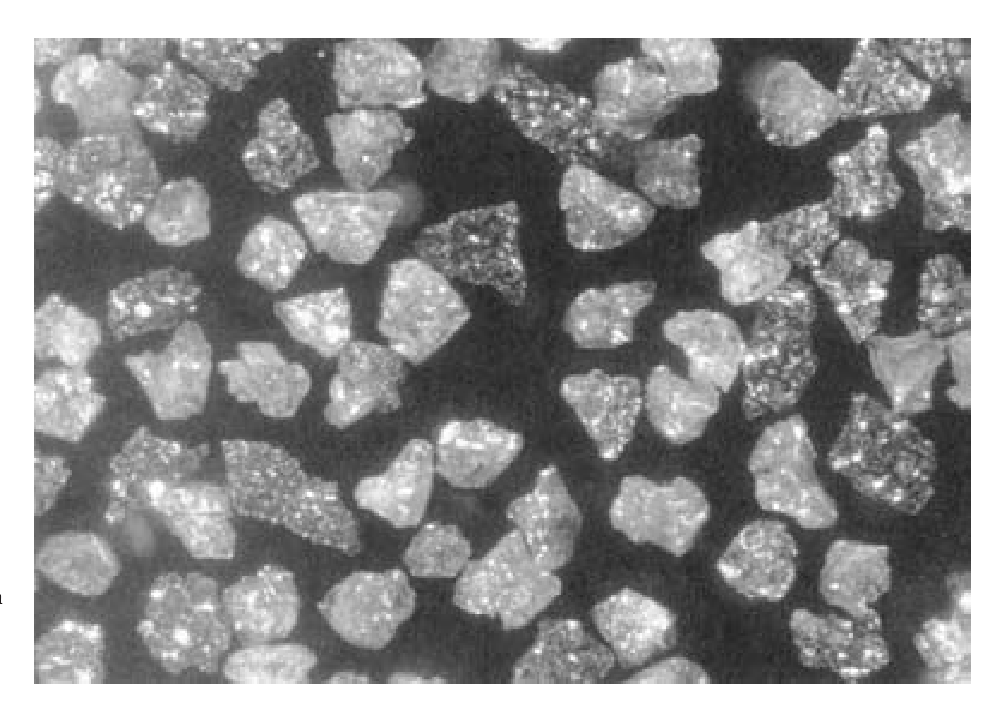


FIGURA 7.2 Polvos de diamante producidos en forma sintética. (Fotografía por cortesía de GE Superabrasives, General Electric Company.)

Se utiliza en herramientas de corte y esmeriles para maquinar materiales duros y frágiles, u otros muy abrasivos. Por ejemplo, se emplean herramientas y ruedas de diamante para cortar cerámicos, fibra de vidrio y metales endurecidos que no sean acero. El diamante también se emplea en la elaboración de herramientas para afilar esmeriles que consisten en otros abrasivos tales como alúmina y carburo de silicio. Igual que el grafito, el diamante tiene propensión a oxidarse (descomponerse) en el aire a temperaturas por arriba de 650 ºC (1 200 ºF).

Los diamantes industriales o sintéticos datan de la década de 1950, y se fabrican calentando grafito alrededor de 3 000 ºC (5 400 ºF) a presiones muy altas (véase la figura 7.2). Este proceso se parece a las condiciones geológicas en que se formaron los diamantes naturales hace millones de años.

7.5.2 Silicio

El silicio es un elemento semimetálico del mismo grupo del carbono en la tabla periódica (véase la figura 2.1). El silicio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, de la que comprende aproximadamente el 26% de su peso (véase la tabla 7.1). Se presenta en forma natural sólo como compuesto químico en rocas, arena, arcilla y suelos, ya sea como dióxido de silicio o compuestos más complejos de silicato. Como elemento tiene la misma estructura cristalina que el diamante, pero su dureza es menor. Es duro pero frágil, ligero, de química inactiva a temperatura ambiente y se clasifica como semiconductor.

Las cantidades mayores de silicio para la manufactura ocurren en compuestos de cerámica (SiO_2 en vidrios y silicatos de arcillas) y elementos de aleaciones de acero, aluminio y cobre. También se emplea como agente reductor en ciertos procesos metalúrgicos. El silicio puro tiene importancia tecnológica como material base para la manufactura de semiconductores para la electrónica. La gran mayoría de circuitos integrados que se producen hoy día están elaborados de silicio (véase el capítulo 35).

TABLA 7.7 Guía para el procesamiento de materiales cerámicos y los elementos carbono, silicio y boro.

Material	Capítulo o sección	Material	Capítulo o sección
Vidrio	Capítulo 12	Diamantes sintéticos	Sección 23.2.6
Fibras de vidrio	Sección 12.2.3	Silicio	Sección 35.2
Cerámicos en forma de partículas	Capítulo 17	Fibras de carbono	Sección 15.1.2
Cermets	Sección 17.3	Fibras de boro	Sección 15.1.2

7.5.3 Boro

El boro es un elemento semimetálico del mismo grupo de la tabla periódica en el que se encuentra el aluminio. Por peso, sólo constituye el 0.001% de la corteza terrestre, y ocurre por lo común como los minerales bórax ($Na_2B_4O_7$–$10H_2O$) y ***kernita*** ($Na_2B_4O_7$–H_2O). El boro es ligero y muy rígido (módulo de elasticidad alto) en forma de fibra. En términos de sus propiedades eléctricas, se clasifica como semiconductor (su conductividad varía con la temperatura; a temperaturas bajas es aislante, pero a elevadas es conductor).

Como material de importancia industrial, el boro se encuentra por lo general en forma de compuesto. Como tal, se emplea como solución en operaciones de galvanoplastia de níquel, como ingrediente (B_2O_3) en ciertos compuestos de vidrio, catalizador en reacciones de química orgánica y como nitruro (nitruro de boro cúbico) para herramientas de corte. En forma casi pura se utiliza como fibra en materiales compuestos (véanse las secciones 9.4.1 y 15.1.2).

7.6 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS MATERIALES CERÁMICOS

El procesamiento de los materiales cerámicos se divide en dos categorías básicas: fundidas y de partículas. La categoría principal de los cerámicos fundidos es el trabajo del vidrio (véase el capítulo 12). Los materiales cerámicos en forma de partículas incluyen los tradicionales y los nuevos; cuyos métodos de procesamiento constituyen el resto de la tecnología de formado de cerámicas (véase el capítulo 17). Los cermets, tales como los carburos cementados, son un caso especial porque son matrices metálicas compuestas (véase la sección 17.3). En la tabla 7.7 se da una guía para el procesamiento de materiales cerámicos y los elementos carbono, silicio y boro.

REFERENCIAS

[1] Chiang, Y. M., Birnie III, D. P. y Kingery, W. D. ***Physical Ceramics***, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1997.
[2] ***Engineered Materials Handbook***, vol. **4, *Ceramics and Glasses.*** ASM International**,** 1991.
[3] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.
[4] Hlavac, J. ***The Technology of Glass and Ceramics***. Elsevier Scientific Publishing Company, Nueva York, 1983.
[5] Kingery, W. D., Bowen, H. K. y Uhlmann, D. R. ***Introduction to Ceramics***, 2a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.
[6] Kirchner, H. P. ***Strengthening of Ceramics***. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1979.
[7] Richerson, D. W. ***Ceramics–Applications in Manufacturing***. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1989.
[8] Richerson, D. W. ***Modern Ceramic Engineering***, 2a. ed. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1992.
[9] Scholes, S. R. y Greene, C. H. ***Modern Glass Practice***, 7a. ed. CBI Publishing Company, Boston, Mass., 1993.
[10] Schwarzkopf, P. y Kieffer, R. ***Cemented Carbides***. The MacMillan Company, Nueva York, 1960.
[11] Singer, F. y Singer, S. S. ***Industrial Ceramics***. Chemical Publishing Company, Nueva York, 1963.
[12] Somiya, S. (ed.). ***Advanced Technical Ceramics***. Academic Press, Inc., San Diego, Calif., 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

7.1. ¿Qué es un cerámico?
7.2. ¿Cuáles son los cuatro elementos más comunes en la corteza terrestre?
7.3. ¿Cuál es la diferencia entre los cerámicos tradicionales y los nuevos?
7.4. ¿Cuál es la característica que diferencia al vidrio de los cerámicos tradicionales y los nuevos?
7.5. ¿Por qué el grafito y el diamante no se clasifican como cerámicos?
7.6. ¿Cuáles son las propiedades mecánicas generales de los materiales cerámicos?
7.7. ¿Cuáles son las propiedades físicas generales de los materiales cerámicos?
7.8. ¿Qué tipo de enlace atómico caracteriza a los cerámicos?
7.9. ¿Qué tienen en común la bauxita y el corundo?
7.10. ¿Qué es la arcilla, que se emplea para fabricar productos cerámicos?
7.11. ¿Qué es el glaseado, según se aplica a productos cerámicos?
7.12. ¿Cuál es el significado del término refractario?
7.13. ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones principales de los carburos cementados, tales como el WC–Co?
7.14. ¿Cuál es una de las aplicaciones importantes del nitruro de titanio, según se dice en el texto?
7.15. ¿Cuáles son los elementos del material cerámico Sialon?
7.16. Defina vidrio.
7.17. ¿Cuál es el mineral primario de los productos de vidrio?
7.18. ¿Cuáles son algunas de las funciones de los ingredientes que se añaden al vidrio, además del sílice? Mencione al menos tres.
7.19. ¿Qué significa el término desvitrificación?
7.20. ¿Qué es el grafito?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

7.1. ¿Cuál de los siguientes es el elemento más común de la corteza terrestre?: *a*) aluminio, *b*) calcio, *c*) hierro, *d*) oxígeno, o *e*) silicio.
7.2. ¿Los productos de vidrio se basan sobre todo en cuál de los minerales siguientes?: *a*) alúmina, *b*) corundo, *c*) feldespato, *d*) caolinita, o *e*) sílice.
7.3. ¿Cuál de los siguientes contienen cantidades significativas de óxido de aluminio? (hay tres respuestas correctas): *a*) alúmina, *b*) bauxita, *c*) corundo, *d*) feldespato, *e*) caolinita, *f*) cuarzo, *g*) arenisca, y *h*) sílice.
7.4. ¿Cuáles de las cerámicas que siguen se usan en forma común como abrasivos en esmeriles? (dos respuestas correctas): *a*) óxido de aluminio, *b*) óxido de calcio, *c*) monóxido de carbono, *d*) carburo de silicio, o *e*) dióxido de silicio.
7.5. ¿Cuál de los siguientes por lo general es el material más poroso de las vasijas de cerámica?: *a*) porcelana china, *b*) barro, *c*) porcelana, o *e*) porcelana de gres.
7.6. ¿Cuál de los siguientes se hornea a las temperaturas más elevadas?: *a*) porcelana china, *b*) barro, *c*) porcelana, o *d*) porcelana de gres.
7.7. ¿Cuál de las siguientes se aproxima más a la composición química de la arcilla?: *a*) Al_2O_3, *b*) $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, *c*) $3Al_2O_3$–$2SiO_2$, *d*) MgO, o *e*) SiO_2.
7.8. Los vidrios-cerámicos son estructuras cerámicas policristalinas que han sido transformadas al estado vítreo: *a*) verdadero, o *b*) falso.
7.9. ¿Cuál de los materiales que siguen se acerca más al diamante, en cuanto a dureza?: *a*) óxido de aluminio, *b*) dióxido de carbono, *c*) nitruro de boro cúbico, *d*) dióxido de silicio, o *e*) carburo de tungsteno.
7.10. ¿Cuál de las siguientes caracteriza mejor la estructura de los vidrios-cerámicos?: *a*) 95% policristalina, *b*) 95% vítrea, o *c*) 50% policristalina.
7.11. Las propiedades y características de los vidrios-cerámicos incluyen a cuáles de las siguientes (dos respuestas son las mejores): *a*) eficiencia en el procesamiento, *b*) conductividad eléctrica, *c*) expansión térmica elevada, o *d*) resistencia, respecto de otros cerámicos.
7.12. ¿El diamante es el material más duro que se conoce?: *a*) verdadero, o *b*) falso.
7.13. Los diamantes sintéticos datan de: *a*) tiempos antiguos, *b*) el siglo XIX, *c*) la década de 1950, o *d*) la década de 1980.



POLÍMEROS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

De los tres tipos básicos de materiales, los polímeros son al mismo tiempo los más nuevos y los más viejos conocidos por el ser humano. Los polímeros forman a los organismos vivos y a todos los procesos vitales sobre la Tierra. Para el hombre antiguo, los polímeros biológicos eran fuente de comida, abrigo y de muchos de sus implementos. Sin embargo, en este capítulo el interés se dirige a una clase de polímeros distintos de los biológicos. Con excepción del caucho natural, casi todos los materiales poliméricos que se emplean en la ingeniería hoy día son sintéticos. Los materiales en sí mismos se elaboran por medio de procesamiento químico, y los productos se fabrican con procesos de solidificación.

Un ***polímero*** es un compuesto que consiste en moléculas de cadena larga, cada una de las cuales está hecha de unidades que se repiten y conectan entre sí. En una sola molécula de polímero puede haber miles, incluso millones, de unidades. La palabra se deriva de los vocablos griegos ***poly***, que significa *muchos*, y meros (que se contrae a ***mero***), que es *parte*. La mayoría de los polímeros se basan en el carbono, y por ello se les considera productos químicos orgánicos.

Los polímeros se dividen en ***plásticos*** y ***cauchos (hules)***. Como materiales de ingeniería, son relativamente nuevos en comparación con los metales y los cerámicos, pues sólo datan de alrededor de la mitad del siglo XIX (véase la nota histórica 8.1). Para estudiar los polímeros como materia técnica, es apropiado dividirlos en las siguientes tres categorías, donde 1) y 2) son plásticos y 3) es el caucho:

Nota histórica 8.1 *Historia de los polímeros*

Está claro que uno de los hitos de la historia de los polímeros fue el descubrimiento hecho por Charles Goodyear de la vulcanización del caucho, en 1839 (véase la nota histórica 8.2). En 1851, su hermano Nelson patentó el caucho duro, denominado ***ebonita***, que en realidad es un polímero termofijo. Se utilizó durante muchos años para peines, carcasas de baterías y prótesis dentales.

En 1862, en la International Exhibition de Londres, el químico inglés Alexander Parkes demostró las posibilidades de los primeros termoplásticos, una forma del ***nitrato de celulosa*** (la celulosa es un polímero natural de la madera y el algodón). Lo denominó ***parkesina*** y lo describió como un sustituto del marfil y del caparazón de las tortugas. El material adquirió importancia comercial debido a los esfuerzos del estadounidense John Hyatt, quien combinó nitrato de celulosa y alcanfor (que actúa como un plastificador) junto con calor y presión para formar el producto llamado ***celuloide***. Su patente se emitió en 1870. El plástico celuloide era transparente, y las aplicaciones que se inventaron en forma posterior incluían la película fotográfica y la cinematográfica, así como parabrisas para carruajes y para los primeros automóviles.

Hacia finales del siglo se crearon varios productos con base en la celulosa. Alrededor de 1890 se produjeron por vez primera las fibras de celulosa, llamadas ***rayón***. La película para envolver, el ***celofán***, se comercializó alrededor de 1910. El ***acetato de celulosa*** se adoptó como la base de la película fotográfica por la misma época. Durante las décadas que siguieron, este material llegó a ser un termoplástico importante para el moldeo por inyección.

A principios de 1900, el químico estadounidense, nacido en Bélgica, L. H. Baekeland, inventó el primer plástico sintético. Involucraba la reacción y polimerización del fenol y el formaldehído para formar lo que su inventor denominó ***bakelita***. Esta resina termofija es de importancia comercial aún hoy día. Le siguieron otros polímeros similares: en 1918 la urea-formaldehído, y en 1939 la melamina-formaldehído.

El fin de la década de 1920 y la de 1930 vieron el desarrollo de cierto número de termoplásticos que hoy son de gran importancia. En 1912, I. Ostromislensky patentó el ***cloruro de polivinilo***, pero no se comercializó hasta 1927 como recubrimiento de paredes. Por la misma época, en Alemania se produjo el ***poliestireno***. En Inglaterra, en 1932 se comenzó a hacer la investigación básica que condujo a la síntesis del ***polietileno***; la primera planta de producción empezó a operar justo antes del estallido de la Segunda Guerra Mundial y era para hacer polietileno de baja densidad. Por último, en 1928 se inició un programa importante de investigación, bajo la dirección de W. Carothers, de DuPont de los Estados Unidos, el cual llevó a la síntesis de la poliamida ***nylon***; se comercializó a finales de la década de 1930. Su uso inicial era en la corsetería para damas; sus aplicaciones posteriores durante la guerra incluían cojinetes de baja fricción y aislamiento de alambres. Esfuerzos parecidos llevados a cabo en 1939 en Alemania dieron una forma alternativa de nylon.

En la década de 1940 se crearon varios polímeros importantes de propósito especial: en 1943, los ***fluorocarburos (teflón),*** las ***siliconas*** y los ***poliuretanos***; las resinas ***epóxicas*** se obtuvieron en 1947, y en 1948 el copolímero ***acrilonitrilo-butadieno-estireno*** (ABS). En 1950 llegaron las fibras de ***poliéster***, y en 1957 el ***polipropileno***, el ***policarbonato*** y el ***polietileno de ata densidad***. En la década de 1960 se crearon los ***elastómeros termoplásticos***. Los años posteriores vieron un crecimiento muy grande del uso de los plásticos.

1. Los ***polímeros termoplásticos***, también llamados ***termoplásticos*** (TP), son materiales sólidos a temperatura ambiente, pero si se les calienta a temperaturas de apenas unos cuantos cientos de grados, se vuelven líquidos viscosos. Esta característica permite que adopten formas de productos de modo fácil y económico. Se pueden sujetar repetidas veces al ciclo de calentamiento y enfriamiento sin que el polímero se degrade en forma significativa.
2. A diferencia de los termoplásticos, los ***polímeros termofijos***, o ***termofijos (termoestables) (TS)***, no toleran ciclos repetidos de calentamiento. Cuando se calientan de inicio, se suavizan y fluyen de modo que se pueden moldear, pero las temperaturas elevadas también producen una reacción química que endurece el material y lo convierte en un sólido que no se puede fundir. Si se le vuelve a calentar, los polímeros termofijos o termoestables se degradan y carbonizan, en vez de suavizarse.

3. Los ***elastómeros*** (E) son los cauchos. Se trata de polímeros que presentan alargamiento elástico extremo si se les sujeta a un esfuerzo mecánico relativamente débil. Algunos elastómeros son capaces de estirarse en un factor de 10 y aun así recuperar su forma original por completo. Aunque sus propiedades son muy distintas de las de los termofijos, tienen una estructura molecular similar a la de éstos, pero diferente de la de los termoplásticos.

De los tres tipos, los de mayor importancia comercial son los termoplásticos, pues constituyen alrededor de 70% del peso total de todos los polímeros sintéticos que se producen. Los termofijos y elastómeros contribuyen con 30% a partes casi iguales, con una pequeña ventaja del primero. Los polímeros TP comunes incluyen al polietileno, cloruro de polivinilo, polipropileno, poliestireno y nylon. Ejemplos de los polímeros TS son los fenoles, epóxicos y ciertos poliésteres. El ejemplo más común de los elastómeros es el caucho natural (vulcanizado); sin embargo, los cauchos sintéticos exceden el peso que se produce del natural.

Aunque la clasificación de los polímeros en las categorías TP, TS y E cumple con los propósitos de organizar el tema en este capítulo, debe notarse que en ocasiones los tres tipos se traslapan. Ciertos polímeros que normalmente son termoplásticos podrían hacerse termofijos. Algunos polímeros pueden ser tanto termofijos como elastómeros (debe observarse que sus estructuras moleculares son similares). Y ciertos elastómeros son termoplásticos. Sin embargo, sólo son excepciones al esquema de clasificación general.

El crecimiento de las aplicaciones de los polímeros sintéticos es en verdad impresionante. Sobre una base volumétrica, el uso anual actual de los polímeros supera al de los metales. Las siguientes son algunas razones de la importancia comercial y tecnológica de los polímeros.

➢ Es posible dar formas a los plásticos al moldearlos en formas intrincadas, por lo general sin que se requiera mayor procesamiento. Son muy compatibles con el procesamiento de ***forma neta***.

➢ Los plásticos poseen una lista de propiedades atractivas para muchas aplicaciones de ingeniería en las que la resistencia no es importante: 1) densidad baja respecto de los metales y cerámicos; 2) buenas relaciones de resistencia a peso de ciertos polímeros (pero no todos); 3) resistencia elevada a la corrosión; y 4) baja conductividad eléctrica y térmica.

➢ Sobre una base volumétrica, los polímeros compiten en costo con los metales.

➢ Los polímeros por lo general requieren menos energía que los metales para producirse, sobre una base de volumen. Esto se cumple debido a que es común que las temperaturas para trabajarlos sean mucho más bajas que las que requieren los metales.

➢ Ciertos plásticos son traslúcidos o transparentes, así que para ciertas aplicaciones compiten con el vidrio.

➢ Los polímeros se emplean mucho en materiales compuestos (véase el capítulo 9).

Por el lado negativo, los polímeros tienen en general las limitaciones siguientes: 1) su resistencia es baja en comparación con la de los metales y cerámicos; 2) en el caso de los elastómeros, su módulo de elasticidad o rigidez también es bajo; ésta podría ser, por supuesto, una característica deseable; 3) las temperaturas de uso se limitan a sólo unos cientos de grados debido a la suavización de los polímeros termoplásticos o a la degradación de los termofijos y elastómeros; 4) ciertos polímeros se degradan si se les expone a la luz solar y a otras formas de radiación; y 5) los plásticos muestran propiedades viscoelásticas (véase la sección 3.5), lo que puede ser una limitación notable en aplicaciones de cojinetes para carga.

En este capítulo se estudia la tecnología de materiales poliméricos. La primera sección se dedica a un análisis introductorio de la ciencia y tecnología de los polímeros. En las posteriores, se estudian las tres categorías básicas de los polímeros: termoplásticos, termofijos y elastómeros.

8.1 FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS POLÍMEROS

Los polímeros se sintetizan por medio de la unión de muchas moléculas pequeñas en otras más grandes, llamadas ***macromoléculas***, que poseen una estructura parecida a una cadena. Las unidades pequeñas, llamadas ***monómeros***, por lo general son moléculas orgánicas insaturadas sencillas, tales como el etileno C_2H_4. Los átomos de estas moléculas están unidos con enlaces covalentes; y cuando se unen para formar un polímero, el mismo enlace covalente mantiene a la cadena. Así, cada molécula larga se caracteriza por enlaces primarios fuertes. En la figura 8.1 se ilustra la síntesis de la molécula de polietileno. Según se describe su estructura aquí, el polietileno es un polímero lineal; sus meros forman una cadena larga.

Una masa de material polimérico consiste en muchas macromoléculas; para visualizar la relación de las moléculas individuales con el conjunto del material, a veces se emplea la analogía de un tazón de espagueti recién cocinado (sin salsa). La imbricación de los filamentos largos ayuda a que la masa se mantenga unida, pero es más significativo el enlace atómico. Los enlaces entre las macromoléculas de la masa son del tipo Van der Waals y otros secundarios. Así, el material polimérico agregado se mantiene unido por fuerzas que son mucho más débiles que los enlaces primarios que mantienen a las moléculas juntas. Esto explica por qué los plásticos en general no son tan rígidos ni fuertes como los metales o los cerámicos.

Cuando un polímero termoplástico se calienta, se suaviza. La energía calorífica ocasiona que las macromoléculas se agiten térmicamente, lo que las impulsa para que se muevan una respecto a otra dentro de la masa del polímero (aquí es cuando la analogía del espagueti húmedo pierde su encanto). El material comienza a comportarse como un líquido viscoso, con la viscosidad en disminución (la fluidez aumenta) conforme la temperatura se eleva.

A continuación se ampliará el estudio de estos comentarios de apertura, con el análisis de la forma en que se sintetizan los polímeros y las características de los materiales que resultan de dicha síntesis.

8.1.1 Polimerización

Como proceso químico, la síntesis de los polímeros ocurre por cualquiera de dos métodos: 1) polimerización por adición y 2) polimerización por etapas. La producción de un polímero dado se asocia por lo general con uno u otro método.

Polimerización por adición En este proceso, que ejemplifica el polietileno, se induce a los enlaces dobles existentes entre los átomos de carbono de los monómeros de etileno para que se abran de modo que se unan con otras moléculas de monómero. Las conexiones ocurren en ambos extremos de la macromolécula que se expande, con lo cual se usaron cadenas largas de meros repetitivos. Debido a la manera en que se forman las moléculas, también se conoce al proceso como ***polimerización en cadena***. Comienza con el empleo de un catalizador químico (llamado ***iniciador***) para abrir el doble enlace del carbono en algunos de los monómeros. Éstos, que ahora son muy reactivos debido a sus electrones impares, capturan a otros monómeros para comenzar a formar cadenas reactivas. Las cadenas se propagan con la captura de aún más monómeros, uno a la vez, hasta que se han producido

$$n\begin{bmatrix} H & H \\ | & | \\ C = & C \\ | & | \\ H & H \end{bmatrix} \longrightarrow -\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}\cdots n \equiv \left[-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}=\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{C}}-\right]_n$$

1) 2*a*) 2*b*)

FIGURA 8.1 Síntesis del polietileno a partir de monómeros de etileno: 1) *n* monómeros de etileno producen 2*a*) cadena de polietileno de longitud *n*; 2*b*) notación concisa para ilustrar la estructura del polímero de cadena de longitud *n*.

FIGURA 8.2 Modelo de polimerización por adición (cadena): 1) inicio, 2) adición rápida de monómeros, y 3) molécula resultante de polímero de cadena larga con *n* meros al terminar la reacción.

Inicio
Monómeros
Meros
1)
2)
3)

moléculas largas y la reacción termina. El proceso ocurre como se ilustra en la figura 8.2. La reacción completa de polimerización sólo toma algunos segundos para cualquier macromolécula dada. Sin embargo, en el proceso industrial, terminar la polimerización de un lote dado lleva minutos o incluso horas, ya que en la mezcla no todas las reacciones de las cadenas ocurren en forma simultánea.

En la figura 8.3 se enlistan otros polímeros que es común que se formen mediante polimerización por adición, así como el monómero de inicio y el mero de repetición. Observe que la fórmula química del monómero es la misma que la del mero en el polímero. Ésta es una característica del método de polimerización. También observe que muchos de los polímeros comunes involucran la sustitución de algunos átomos o moléculas alternativos en lugar de uno de los átomos de H en el polietileno. Ejemplos de esta sustitución son el polipropileno, cloruro de polivinilo y poliestireno. En el politetrafluoretileno se remplazan todos los átomos de H en la estructura, con átomos de flúor (F). La mayor parte de los polímeros por adición son termoplásticos. En la figura 8.3, la excepción es el poliisopreno, el polímero del caucho natural. Aunque se forma con polimerización por adición, se trata de un elastómero.

FIGURA 8.3 Algunos polímeros comunes que se forman mediante polimerización por adición (cadena).

Polímero	Monómero	Mero de repetición	Fórmula química
Polipropileno	$CH_2{=}CH(CH_3)$	$[-CH_2-CH(CH_3)-]_n$	$(C_3H_6)_n$
Cloruro de polivinilo	$CH_2{=}CH(Cl)$	$[-CH_2-CH(Cl)-]_n$	$(C_2H_3Cl)_n$
Poliestireno	$CH_2{=}CH(C_6H_5)$	$[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_n$	$(C_8H_8)_n$
Politetrafluoretileno (teflón)	$CF_2{=}CF_2$	$[-CF_2-CF_2-]_n$	$(C_2F_4)_n$
Poliisopreno (caucho natural)	$CH_2-CH{=}C(CH_3)-CH_2$	$[-CH_2-CH{=}C(CH_3)-CH_2-]_n$	$(C_5H_8)_n$

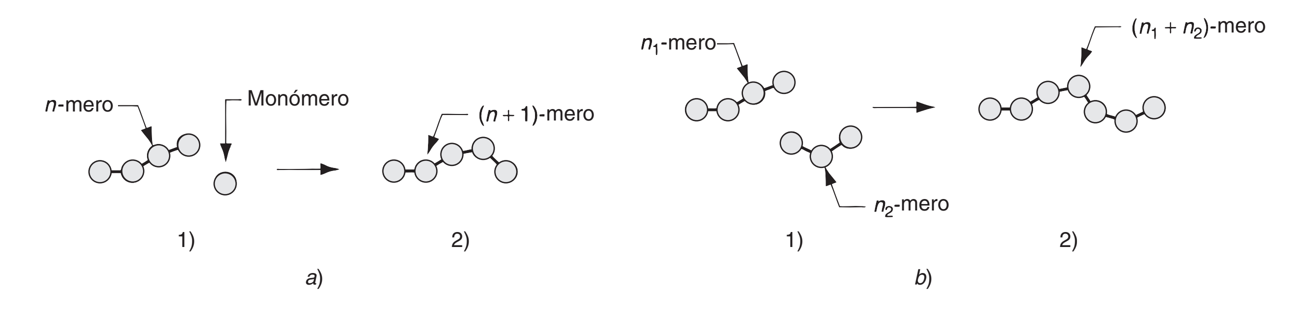


FIGURA 8.4 Modelo de polimerización por etapas que muestra los dos tipos de reacción que ocurren: *a*) *n*-mero que captura un monómero individual para formar un (n + 1)-mero; y *b*) n_1-mero que se combina con un n_2-mero para formar un ($n_1 + n_2$)-mero. La secuencia se ilustra en 1) y 2)

Polimerización por etapas En esta forma de polimerización, se hace reaccionar a dos monómeros para formar una molécula nueva del compuesto que se desea obtener. En la mayor parte (pero no en todos) de los procesos de polimerización por etapas también se produce un subproducto de la reacción. Es común que éste sea agua que se condensa; es por ello que se utiliza con frecuencia el término ***polimerización por condensación*** para los procesos en que ésta ocurre. Conforme la reacción tiene lugar, se combinan más moléculas de los reactivos con las moléculas que se sintetizaron primero para formar polímeros de longitud $n = 2$, después polímeros de longitud $n = 3$, y así sucesivamente. Polímeros de n creciente se forman de modo lento y por etapas. Además de esta elongación gradual de las moléculas, también se combinan polímeros intermedios de longitud n_1 y n_2 para formar moléculas de longitud $n = n_1 + n_2$, por lo que una vez que el proceso está en marcha ocurren de manera simultánea dos tipos de reacción, como se ilustra en a figura 8.4. En consecuencia, en cualquier momento del proceso la mezcla contiene polímeros de longitudes distintas. Las moléculas de la longitud adecuada se forman sólo después de que ha pasado tiempo suficiente.

Debe notarse que el subproducto de la reacción no siempre es agua; por ejemplo, el amoniaco (NH_3) es otro compuesto simple que se produce en ciertas reacciones. No obstante, todavía se emplea el término polimerización por condensación. También debe notarse que aunque la mayoría de procesos de polimerización involucran la condensación de un subproducto, hay algunos que no. En la figura 8.5 se dan ejemplos de polímeros comerciales que se producen mediante polimerización por etapas (condensación). Los polímeros tanto termoplásticos como termofijos se sintetizan con este método; el nylon-6,6 y el policarbonato son polímeros TP, mientras que el fenol formaldehído y la urea formaldehído son polímeros TS.

Grado de polimerización y peso molecular Una macromolécula producida por polimerización consiste en n meros repetitivos. Como todas las moléculas en una masa dada de material polimerizado varían en longitud, la n de la masa es un promedio; sigue la distribución estadística normal. El valor medio de n se denomina ***grado de polimerización*** (DP, por siglas en inglés) de la masa. El grado de polimerización afecta las propiedades del polímero: un DP elevado incrementa la resistencia mecánica pero también la viscosidad del estado fluido, lo que hace que el procesamiento sea más difícil.

El ***peso molecular*** (MW, por sus siglas en inglés) de un polímero es la suma de los pesos moleculares de los meros de la molécula; es n veces el peso molecular de cada unidad de repetición. Como la n varía para las distintas moléculas en la masa, el peso molecular debe interpretarse como un promedio. En la tabla 8.1 se presentan valores comunes de DP y MW para polímeros seleccionados.

Polímero	Unidad repetitiva	Fórmula química	Condensado
Nylon-6,6	$-[(CH_2)_6-NH-CO-(CH_2)_4-CO-NH]_n-$	$[(CH_2)_6(CONH)_2(CH_2)_4]_n$	H_2O
Policarbonato	$-[(C_6H_4)-C(CH_3)_2-(C_6H_4)-O-C(=O)-O]_n-$	$(C_3H_6(C_6H_4)_2CO_3)_n$	HCl
Fenol formaldehído	$-[C_6H_4(OH)-CH_2]_n-$	$[(C_6H_4)CH_2OH]_n$	H_2O
Urea formaldehído	$-[C(NH)(NH)=O-CH_2]_n-$	$(CO(NH)_2CH_2)_n$	H_2O

FIGURA 8.5 Algunos polímeros comunes formados mediante polimerización por etapas (condensación); (expresión simplificada de la estructura y fórmula; no se presentan los extremos de la cadena del polímero).

8.1.2 Estructuras de los polímeros y copolímeros

Existen diferencias estructurales entre las moléculas de los polímeros, incluso entre las del mismo polímero. En esta sección se estudian tres aspectos de la estructura molecular: 1) estereorregularidad, 2) ramificación y cruzamientos y 3) copolímeros.

Estereorregularidad La ***estereorregularidad*** tiene que ver con el arreglo espacial de los átomos y sus grupos en las unidades repetitivas de la molécula del polímero. Un aspecto importante de la estereorregularidad es la forma en que los grupos de átomos se localizan a lo largo de la cadena para un polímero que tiene uno de los átomos de H en sus meros remplazado por algún otro átomo o grupo de átomos. Un ejemplo de esto es el polipropileno; es similar al polietileno, excepto que el CH_3 es sustituido por uno de los cuatro átomos de H en el mero. Son posibles tres arreglos tácticos, como se ilustra en la figura 8.6: *a*) ***isotáctico***, en el que los grupos impares de átomos se encuentran todos en el mismo lado; *b*) ***sindiotáctico***, en el que los grupos de átomos alternan en los lados opuestos; y *c*) ***atáctico***, en el que los grupos se encuentran en cualquier lado, aleatoriamente.

TABLA 8.1 Valores normales del grado de polimerización y peso molecular para polímeros termoplásticos seleccionados.

Polímero	Grado de polimerización (n)	Peso molecular
Polietileno	10 000	300 000
Poliestireno	3 000	300 000
Cloruro de polivinilo	1 500	100 000
Nylon	120	15 000
Policarbonato	200	40 000

Recopilado de la referencia [7]

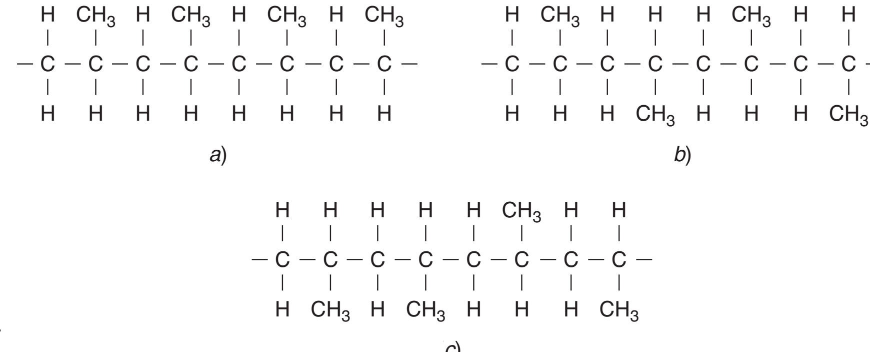
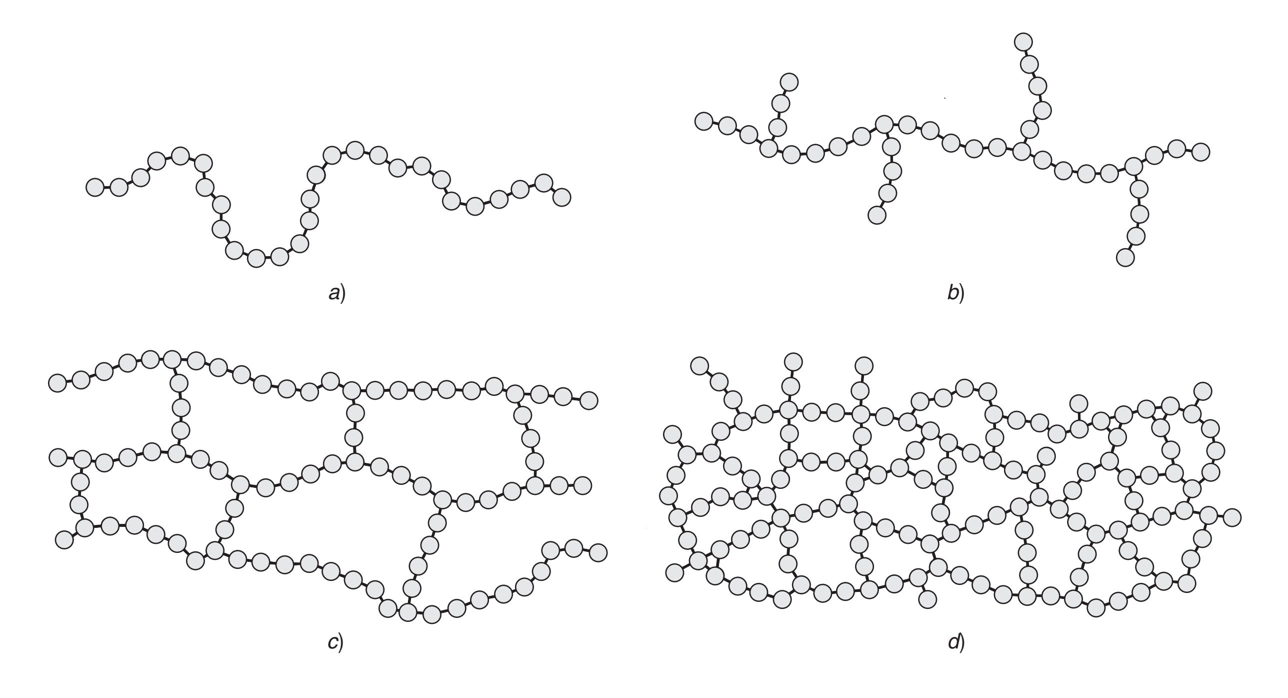


FIGURA 8.6 Arreglos posibles de los grupos de átomos en el polipropileno: *a*) isotáctico, *b*) sindiotáctico, y *c*) atáctico.

La estructura táctica es importante para determinar las propiedades del polímero. También influye en la tendencia de un polímero para cristalizar (véase la sección 8.1.3). Si se continúa con el ejemplo del polipropileno, este polímero se sintetiza en cualquiera de las tres estructuras tácticas. En su forma isotáctica es fuerte y se funde a 175 ºC (347 ºF); la estructura sindiotáctica también es fuerte, si bien se funde a 131 ºC (268 ºF); pero el polipropileno atáctico es suave y se funde alrededor de 75 ºC (165 ºF), y tiene poco uso comercial [6], [9].

Polímeros lineales, ramificados y entrecruzados Se describió el proceso de polimerización como la generación de macromoléculas de una estructura semejante a una cadena, denominada ***polímero lineal***. Ésta es la estructura característica de un polímero termoplástico. También son posibles otras estructuras, como se ilustra en la figura 8.7. Una posibilidad es que ramas laterales se formen a lo largo de la cadena, lo que da como resultado un ***polímero ramificado***, que se presenta en la figura 8.7*b*). En el polietileno, esto ocurre porque los

FIGURA 8.7 Varias estructuras de moléculas de polímeros: *a*) lineal, característica de los termoplásticos; *b*) ramificada; *c*) entrecruzada holgada, como en los elastómeros; y *d*) entrecruzada estrecha, como en un termofijo.



átomos de hidrógeno son remplazados por átomos de carbono en puntos al azar a lo largo de la cadena, con lo que se inicia el crecimiento de una cadena en rama en cada ubicación. Para ciertos polímeros ocurren enlaces primarios entre las ramas y otras moléculas en ciertos puntos de conexión, para formar ***polímeros entrecruzados***, como se ilustra en la figura 8.7*c*) y *d*). El entrecruzamiento sucede porque cierta proporción de los monómeros que se usan para formar el polímero son capaces de enlazarse con otros adyacentes en más de los dos lados, lo que permite que se agreguen las ramas de otras moléculas. Las estructuras entrecruzadas flojas son características de los elastómeros. Cuando el polímero está muy entrecruzado se dice que tiene ***estructura de red***, como en el inciso *d*) de la figura; en realidad, la masa entera es una macromolécula gigante. Los plásticos termofijos adoptan esta estructura después de la curación.

La presencia de la ramificación y el entrecruzamiento en los polímeros tiene un efecto significativo sobre sus propiedades. Es la base de la diferencia entre las tres categorías de polímeros: TP, TS y E. Los polímeros termoplásticos siempre poseen estructuras lineales o ramificadas, o una mezcla de las dos. La ramificación incrementa la imbricación de las moléculas, lo que generalmente hace que el polímero sea más fuerte en estado sólido y más viscoso a una temperatura dada en estado líquido o plástico.

Los plásticos termofijos y los elastómeros son polímeros entrecruzados. El entrecruzamiento ocasiona que el polímero sea químicamente estable; la reacción no puede revertirse. Su efecto es cambiar de manera permanente la estructura del polímero; si se calienta, se degrada o quema, en lugar de fundirse. Los termofijos poseen un grado alto de entrecruzamiento, mientras que los elastómeros poseen un grado bajo. Los termofijos son duros y frágiles, en tanto que los elastómeros son elásticos y resilientes.

Copolímeros El polietileno es un ***homopolímero***, igual que el polipropileno, poliestireno y muchos otros plásticos comunes; sus moléculas consisten en meros repetidos que son todos del mismo tipo. Los ***copolímeros*** son polímeros cuyas moléculas están hechas de unidades repetidas de dos tipos diferentes. Un ejemplo es el copolímero sintetizado a partir del etileno y propileno, y que resulta con propiedades elastoméricas. El copolímero etileno-propileno se representa como sigue:

$$—(C_2H_4)_n(C_3H_6)_m—$$

donde el rango de n y $\boldsymbol{m}$ varía entre 10 y 20, y las proporciones de los dos constituyentes son de alrededor de 50% cada una. En la sección 8.4.3 se verá que la combinación de polietileno con polipropileno y cantidades pequeñas de dienos es un caucho sintético importante.

Los copolímeros poseen arreglos diferentes de sus meros constitutivos. En la figura 8.8 se ilustran las posibilidades: *a*) ***copolímero alternante***, en el que los meros se repiten en lugares alternados; *b*) ***aleatorio***, en el que los meros se hallan al azar, y la frecuencia depende de las

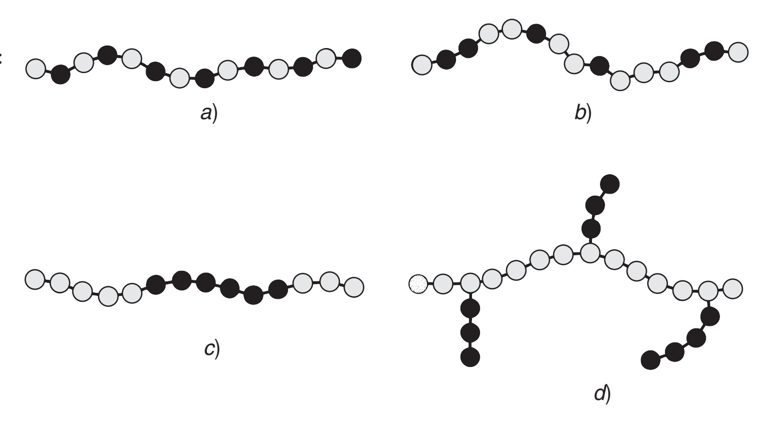


FIGURA 8.8 Distintas estructuras de copolímeros: *a*) alternante, *b*) aleatorio, *c*) bloque y *d*) inserción.

proporciones relativas de los monómeros de inicio; *c*) ***bloque***, en el que meros del mismo tipo tienden a agruparse por sí mismos en segmentos largos en la longitud de la cadena; y d) ***inserción***, en el que los meros de un tipo se unen como ramas a un tronco principal de meros del otro tipo. El caucho dieno de etileno-propileno, que ya se mencionó, es del tipo bloque.

La síntesis de los copolímeros es análoga a alear metales para formar soluciones sólidas. Igual que en dichas aleaciones, las diferencias en los ingredientes y estructura de los copolímeros tienen un efecto sustancial en las propiedades. Ejemplo de esto es la mezcla que se ha mencionado de polietileno-polipropileno. Por sí solo, cada uno de estos polímeros es muy rígido; pero una mezcla al 50-50 forma un copolímero de estructura aleatoria parecida al caucho.

También es posible sintetizar ***polímeros ternarios*** o ***terpolímeros***, que consisten en meros de tres tipos diferentes. Ejemplo de esto es el plástico ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno, por lo cual no sorprende que lo llamen ABS).

8.1.3 Cristalinidad

En los polímeros es posible estructuras tanto amorfas como cristalinas, aunque su tendencia a cristalizar es mucho menor que la de los metales o cerámicos no vítreos. No todos los polímeros pueden formar cristales. Para aquellos que sí, el ***grado de cristalinidad*** (proporción de la masa que consiste en material cristalizado) siempre es menor que 100%. Conforme en un polímero se incrementa la cristalinidad, también lo hacen 1) la densidad, 2) rigidez, resistencia y tenacidad, y 3) resistencia al calor. Además, 4) si el polímero es transparente en estado amorfo, se vuelve opaco cuando se cristaliza en forma parcial. Muchos polímeros son transparentes, pero sólo en estado amorfo (vítreo). Algunos de esos efectos quedan ilustrados por las diferencias entre el polietileno de baja densidad y el de alta densidad, que se presentan en la tabla 8.2. La razón subyacente para las diferencias en las propiedades de estos materiales es el grado de cristalinidad.

Los polímeros lineales consisten en moléculas largas con miles de meros repetidos. La cristalización en estos polímeros involucra el plegamiento hacia delante y atrás de las cadenas largas sobre sí mismas para adquirir un arreglo muy regular de los meros, según se ilustra en la figura 8.9*a*). Las regiones cristalizadas se denominan ***cristalitas***. Debido a la longitud tan grande de una molécula sola (a escala atómica), puede participar en más de una cristalita. Asimismo, en una región cristalina única puede combinarse más de una molécula. Las cristalitas adoptan la forma laminar, como se ilustra en la figura 8.9b, mezcladas al azar con material amorfo. Así, un polímero que cristaliza es un sistema con dos fases, cristalitas dispersas en una matriz amorfa.

Cierto número de factores determinan la capacidad o tendencia de un polímero para formar regiones cristalinas dentro del material. Los factores se resumen como sigue: 1) como regla general, sólo los polímeros lineales forman cristales; 2) tiene importancia crítica la estereorregularidad de la molécula [13]; los polímeros isotácticos siempre forman cristales, los sindiotácticos a veces y los atácticos nunca; 3) los copolímeros, debido a su irregularidad molecular, rara vez forman cristales; 4) el enfriamiento lento favorece

TABLA 8.2 Comparación del polietileno de baja densidad con el de alta.

Tipo de polietileno	Densidad baja	Densidad alta
Grado de cristalinidad	55%	92%
Gravedad específica	0.92	0.96
Módulo de elasticidad	140 MPa (2,000 lb-in^2)	700 MPa (100,000 lb-in^2)
Temperatura de fusión	115° C (239°F)	135°C(275°F)

Recopilado de la referencia [6]. Los valores que se dan son los frecuentes.

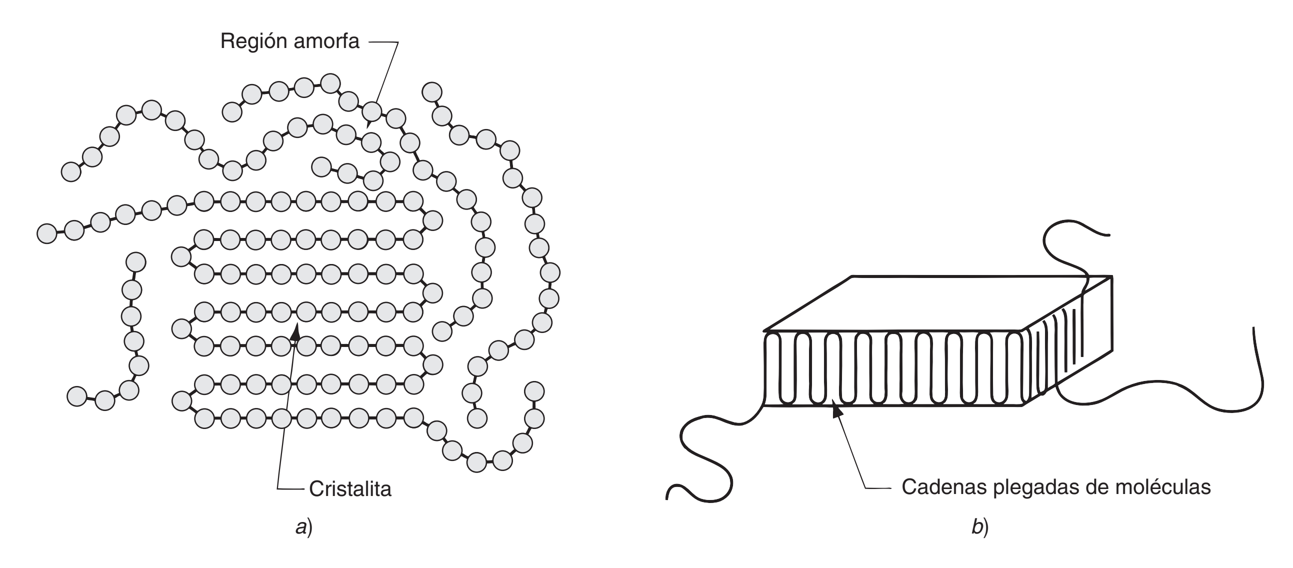
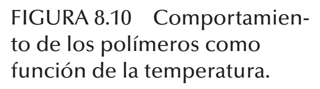


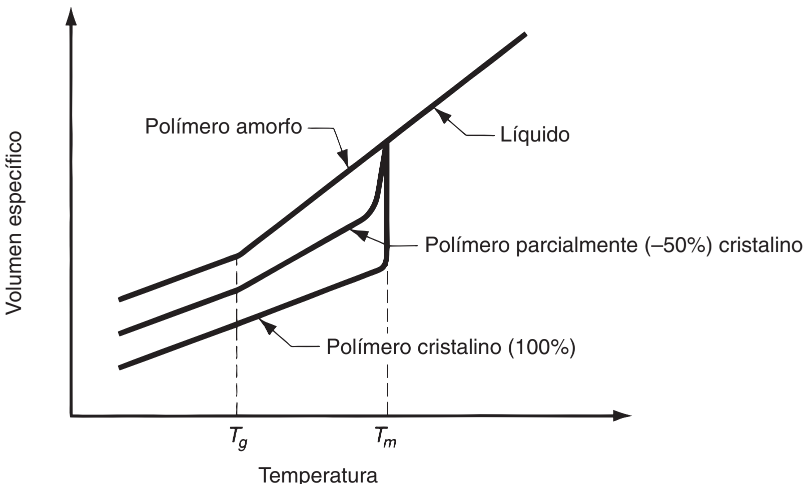
FIGURA 8.9 Regiones cristalizadas en un polímero: *a*) moléculas largas que forman cristales al azar mezcladas con material amorfo; y *b*) cadena plegada en forma de lámina, forma común de una región cristalizada.

la formación y crecimiento de cristales, como sucede en los metales y cerámicas; 5) la deformación mecánica, como en el estiramiento de un termoplástico calentado, tiende a alinear la estructura y a incrementar la cristalización; 6) los plastificadores (productos químicos que se agregan a un polímero para suavizarlo) reducen el grado de cristalinidad.

8.1.4 Comportamiento térmico de los polímeros

El comportamiento térmico de los polímeros con estructuras cristalinas es diferente del de aquellos que son amorfos (véase la sección 2.4). El efecto de la estructura se observa en la gráfica del volumen específico (el inverso de la densidad) como función de la temperatura, como se aprecia en la figura 8.10. Un polímero muy cristalino tiene un punto de fusión T_m en el que su volumen sufre un cambio abrupto. Asimismo, a temperaturas por arriba de T_m, la expansión térmica del material fundido es mayor que la del sólido por debajo de T_m. Un polímero amorfo no sufre los mismos cambios abruptos en la T_m. Conforme se enfría


FIGURA 8.10 Comportamiento de los polímeros como función de la temperatura.



a partir del estado líquido, su coeficiente de expansión térmica continúa la declinación a lo largo de la misma trayectoria, que tenía cuando estaba fundido, y se hace cada vez más viscoso con la disminución de la temperatura. Durante el enfriamiento por debajo de T_m, el polímero cambia de líquido a algo similar al caucho. Conforme la temperatura desciende, se alcanza un punto final en el que la expansión térmica del polímero amorfo cae de súbito. Ésta es la ***temperatura de transición al vidrio***, T_g (véase la sección 3.5), considerada como el cambio de pendiente. Por debajo de T_g, el material es duro y frágil.

Entre esos dos extremos, se encuentra un polímero cristalizado en forma parcial, como se indica en la figura 8.10. Es un promedio de los estados cristalino y amorfo que depende del grado de cristalinidad. Por arriba de T_m presenta las características viscosas de un líquido; entre T_m y T_g tiene propiedades viscoelásticas; y por debajo de T_g tiene las propiedades elásticas convencionales de un sólido.

Lo que se ha descrito en esta sección se aplica a los materiales termoplásticos, que se desplazan muchas veces hacia arriba y abajo de la curva de la figura 8.10. La manera en que se calientan y enfrían cambia la trayectoria que siguen. Por ejemplo, las tasas rápidas de enfriamiento inhiben la formación de cristales e incrementan la temperatura de transición al vidrio. Los termofijos y elastómeros enfriados a partir del estado líquido se comportan como un polímero amorfo hasta que ocurre el entrecruzamiento. Su estructura molecular restringe la formación de cristales. Y una vez que sus moléculas se entrecruzan ya no regresan al estado fundido si se calientan.

8.1.5 Aditivos

Las propiedades de los polímeros con frecuencia cambian para bien si se les combina con aditivos. Los aditivos alteran la estructura molecular del polímero, o bien agregan una segunda fase al plástico, y lo transforman, en efecto, en un material compuesto. Los aditivos se clasifican según su función como 1) rellenos, 2) plastificadores, 3) colorantes, 4) lubricantes, 5) retardantes de flama, 6) agentes de entrecruzamiento, 7) absorbedores de luz ultravioleta y 8) antioxidantes.

Relleno Los ***rellenos*** son materiales que se agregan en forma de partículas o fibras a un polímero, a fin de alterar las propiedades mecánicas de éste o sólo para reducir el costo del material. Otras razones para usar los rellenos son mejorar la estabilidad dimensional y térmica. Ejemplos de rellenos que se emplean con polímeros son las fibras y polvos de celulosa (por ejemplo, fibras de algodón y aserrín, respectivamente); polvos de sílice (SiO_2), carbonato de calcio ($CaCO_3$) y arcilla (silicato de aluminio hidratado); y fibras de vidrio, metal, carbono u otros polímeros. Los rellenos que mejoran las propiedades mecánicas se denominan ***agentes reforzadores***, y los compuestos que se crean de ese modo reciben el nombre de ***plásticos reforzados***; tienen más rigidez, resistencia, dureza y tenacidad que el polímero original. Las fibras proporcionan el efecto de resistencia más grande.

Plastificadores Los ***plastificadores*** son productos químicos que se agregan a un polímero para hacerlo más suave y flexible, y para mejorar sus características de flujo durante la formación. El plastificador funciona al reducir la temperatura de transición al vidrio por debajo de la del ambiente. En tanto que por debajo de T_g el polímero es duro y frágil, por arriba de esa temperatura es suave y rígido. Un buen ejemplo es el agregar un plastificador[1] al cloruro de polivinilo; en función de la proporción de plastificador que haya en la mezcla, el PVC obtiene un rango de propiedades, desde rígido y frágil a flexible y parecido al caucho.

[1] El plastificador normal en el PVC es el dioctil ftalato, un éster ftalato.

Colorantes Una ventaja que tienen muchos polímeros sobre los metales y cerámicos es que puede obtenerse el mismo material de cualquier color. Esto elimina la necesidad de operaciones secundarias de recubrimiento. Los colorantes para los polímeros son de dos tipos: pigmentos y tinturas. Los ***pigmentos*** son materiales pulverizados finamente, insolubles y que deben distribuirse de manera uniforme en todo el polímero en concentraciones muy bajas, por lo general menores a 1%. Es frecuente que agreguen opacidad o bien color al plástico. Las ***tinturas*** son productos químicos que es usual aplicar en forma líquida, y que por lo general son solubles en el polímero. Normalmente se usan para dar colores transparentes a plásticos tales como estireno y acrílicos.

Otros aditivos Los ***lubricantes*** en ocasiones se agregan al polímero para reducir la fricción y facilitar el flujo hacia la interfaz del molde. También son útiles para liberar la pieza del molde en las operaciones de inyección. Con frecuencia para el mismo propósito se utilizan agentes que se rocían en la superficie del molde para liberarlo.

Casi todos los polímeros arden si se suministra el calor y oxígeno requeridos. Algunos son más combustibles que otros. Los ***retardantes de flama*** son productos químicos que se agregan a los polímeros para reducir la inflamabilidad, por alguno de los mecanismos siguientes o combinación de ellos: 1) interferencia con la propagación de la flama, 2) producción de grandes cantidades de gases incombustibles o 3) aumento de la temperatura de combustión del material. Los productos químicos también sirven para 4) reducir la emisión de gases nocivos o tóxicos que se generan durante la combustión.

Entre los aditivos debe incluirse aquellos que hacen que haya entrecruzamiento en los polímeros termofijos y elastómeros. El término ***agente de entrecruzamiento*** se refiere a una variedad de ingredientes que ocasionan una reacción de entrecruzamiento o que actúan como catalizadores que la facilitan. Algunos ejemplos comerciales importantes son 1) el azufre en la vulcanización del caucho natural, 2) formaldehído de los fenoles para formar plásticos termofijos y 3) peróxidos para poliésteres.

Muchos polímeros son susceptibles de degradarse por acción de la luz ultravioleta (por ejemplo, la luz solar) y la oxidación. La degradación se manifiesta como el rompimiento de enlaces en las moléculas de cadena largas. Por ejemplo, el polietileno es vulnerable a ambos tipos de degradación, lo que lleva a una pérdida de la resistencia mecánica. Los ***absorbedores de luz ultravioleta*** y los ***antioxidantes*** son aditivos que reducen la susceptibilidad del polímero a estas formas de ataque.

8.2 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

En esta sección se estudian las propiedades del grupo de polímeros termoplásticos, y después se describen sus miembros importantes.

8.2.1 Propiedades de los polímeros termoplásticos

La propiedad definitoria de un polímero termoplástico es que puede calentarse desde el estado sólido hasta el líquido viscoso y después enfriarse hasta volver a ser sólido, y que es posible realizar muchas veces este ciclo de calentamiento y enfriamiento sin que el polímero se degrade. La razón de esta propiedad es que los polímeros TP consisten en macromoléculas lineales (o ramificadas) que no se entrecruzan cuando se calientan. Por el contrario, los termofijos y elastómeros pasan por un cambio químico si se les calienta, con entrecruzamiento de sus moléculas y transformación permanente de estos polímeros.

En realidad, los termoplásticos sí se deterioran químicamente con el calentamiento y enfriamiento repetidos. En el moldeo de plásticos, se hace una distinción entre el material

nuevo o ***virgen*** y el plástico que ya ha sido moldeado con anterioridad (por ejemplo, desechos, piezas defectuosas) y por ello han experimentado ciclos térmicos. Para ciertas aplicaciones sólo el material virgen resulta aceptable. Los polímeros termoplásticos también se degradan paulatinamente si se les sujeta a temperaturas elevadas por debajo de T_m. Este efecto de largo plazo se denomina ***envejecimiento térmico***, e involucra el deterioro químico lento. Algunos polímeros TP son más susceptibles al envejecimiento térmico que otros, y para un material dado, la tasa de deterioro depende de la temperatura.

Propiedades mecánicas En el estudio de las propiedades mecánicas que se hizo en el capítulo 3, se comparó los polímeros con los metales y cerámicos. El termoplástico común a temperatura ambiente se caracteriza por lo siguiente: 1) rigidez muy baja, con módulo de elasticidad de dos (en ciertos casos, de tres) órdenes de magnitud menos que el de los metales y cerámicos; 2) poca resistencia a la tensión, alrededor de 10% de la de los metales; 3) dureza mucho menor; y 4) ductilidad mayor, en promedio, pero con un rango muy amplio de valores, desde 1% de elongación para el poliestireno a 500% o más para el polipropileno.

Las propiedades mecánicas de los termoplásticos dependen de la temperatura. Las relaciones funcionales deben estudiarse en el contexto de las estructuras amorfa y cristalina. Los termoplásticos amorfos son rígidos y parecidos al vidrio por debajo de su temperatura de transición a éste, T_g, y flexibles o parecidos al caucho por arriba de ella. Conforme la temperatura se incrementa sobre T_g, el polímero se hace cada vez más suave, y al final se convierte en un fluido viscoso (nunca es un líquido delgado debido a su peso molecular elevado). El efecto sobre el comportamiento mecánico se ilustra en la figura 8.11, en la que se le define como la resistencia a la deformación. Ésta es análoga al módulo de elasticidad, pero permite observar el efecto de la temperatura sobre el polímero amorfo conforme ocurre la transición de sólido a líquido. Por debajo de T_g, el material es elástico y fuerte. A T_g, se observa una caída súbita en la resistencia a la deformación, cuando el material pasa a su fase de caucho; en esta región su comportamiento es viscoelástico. Conforme la temperatura se incrementa, gradualmente se parece más a un fluido.

Un termoplástico teórico con 100% de cristalinidad tendría un punto de fusión distinto, T_m, en el que se transformaría de sólido a líquido, pero no mostraría un punto T_g perceptible. Por supuesto, los polímeros reales tienen menos de 100% de cristalinidad. Para polímeros cristalizados parcialmente, la resistencia a la deformación se caracteriza por la curva que queda entre los dos extremos, y su posición está determinada por las proporciones relativas de las dos fases. El polímero cristalizado en forma parcial presenta características tanto de los plásticos amorfos como de los cristalizados por completo. Por debajo de T_g, es elástico con resistencia a la deformación que desciende con las

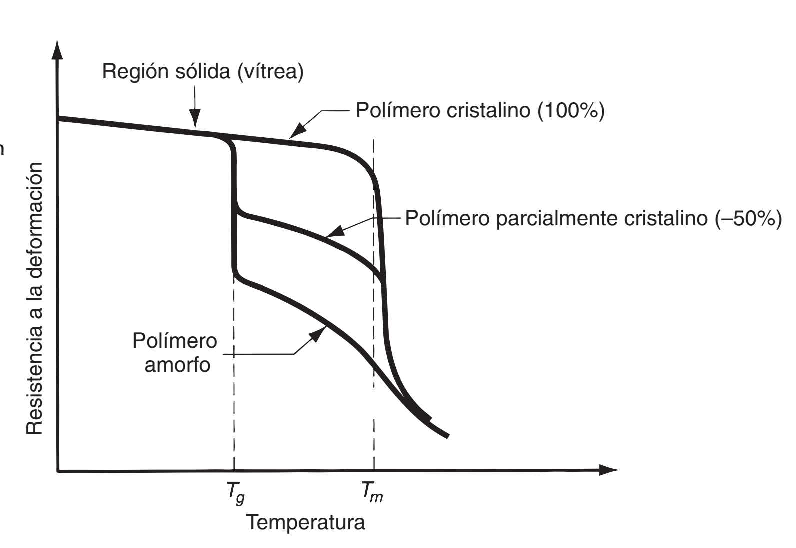


FIGURA 8.11 Relación de las propiedades mecánicas, representadas como resistencia a la deformación, como función de la temperatura para un termoplástico amorfo, uno 100% cristalino (teórico) y otro cristalizado en forma parcial.

temperaturas elevadas. Por arriba de T_g las porciones amorfas del polímero se suavizan, en tanto que las cristalinas quedan intactas. La totalidad del material muestra propiedades que en general son viscoelásticas. Conforme se alcanza T_m, los cristales se funden, lo que da al polímero una consistencia líquida; la resistencia a la deformación ahora se debe a las propiedades viscosas del fluido. El grado en que el polímero adopta características de líquido en la T_m y por arriba de ella depende del peso molecular y del grado de polimerización. Los DP y MW elevados reducen el flujo del polímero, lo que hace más difícil su procesamiento por moldeo y otros métodos parecidos para darle forma. Éste es el dilema que enfrentan aquellos que seleccionan estos materiales con base en que su MW y DP mayores significan una resistencia más grande.

Propiedades físicas Las propiedades físicas de los materiales se estudiaron en el capítulo 4. En general, los polímeros termoplásticos tienen las características siguientes: 1) densidades menores que las de los metales o cerámicos, las gravedades específicas comunes de los polímeros están alrededor de 1.2, las de los cerámicos son de cerca de 2.5, y las de los metales de 7.0; 2) coeficiente de expansión térmica mucho mayor, aproximadamente cinco veces el valor de los metales y 10 veces el de los cerámicos; 3) temperaturas de fusión mucho menores; 4) calores específicos que son de dos a cuatro veces las de los metales y cerámicos; 5) conductividades térmicas de alrededor de tres órdenes de magnitud menos que las de los metales; y 6) propiedades de aislamiento eléctrico.

8.2.2 Importancia comercial de los termoplásticos

Los productos termoplásticos incluyen artículos moldeados y extruidos, fibras, películas, hojas, materiales de empaque, pinturas y barnices. Es normal que las materias primas iniciales para estos productos se suministren al fabricante en forma de polvos o *pelets*, en bolsas, tambos o cargas grandes de camiones o vagones. En esta sección se estudian los polímeros TP más importantes. Para cada plástico se presenta una tabla que enlista la fórmula química y propiedades seleccionadas. Se da la participación aproximada en el mercado respecto de todos los plásticos (termoplásticos y termofijos).

Acetales ***Acetal*** es el nombre común que se da al ***polioximetileno,*** polímero de ingeniería preparado a partir de formaldehído (CH_2O) con mucha rigidez, resistencia, tenacidad y resistencia al desgaste. Además, tiene un punto de fusión alto, poca absorción de la humedad y es insoluble en los solventes comunes a temperatura ambiente. Debido a esta combinación de propiedades, las resinas de acetato compiten con ciertos metales (por ejemplo, latón y zinc) para elaborar componentes automotrices tales como manijas de puertas, carcasas de bombas y piezas similares, armazones de aparatos y componentes de maquinaria.

Acrílicos Los acrílicos son polímeros derivados del ácido acrílico ($C_3H_4O_2$) y de compuestos que se derivan de él. El termoplástico más importante del grupo de los acrílicos es el ***polimetilmetacrilato*** (PMMA) o Plexiglás (marca registrada de Rohn & Haas para el PMMA). En la tabla 8.3*b*) se enlistan los datos sobre el PMMA. Es un polímero amorfo

TABLA 8.3 Polímeros de importancia comercial: *a*) acetal.

Polímero:	Polioximetileno, también conocido como poliacetal $(OCH_2)_n$		
Símbolo:	POM	Elongación:	25% – 75%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.42
Grado de cristalinidad:	75%, común	Temperatura de transición al vidrio:	–80 °C (–112 °F)
Módulo de elasticidad:	3 500 MPa (500 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	180 °C (356 °F)
Resistencia a la tensión:	70 MPa (10 000 lb-in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Mucho menos de 1%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.3 (*continúa*): *b*) acrílicos (termoplástico).

Polímero representativo:	Polimetilmetacrilato $(C_5H_8O_2)_n$		
Símbolo:	PMMA	Elongación:	5
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	1.2
Grado de cristalinidad:	Ninguno (amorfo)	Temperatura de transición al vidrio:	105 °C (221 °F)
Módulo de elasticidad:	2 800 MPa (400 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	200 °C (392 °F)
Resistencia a la tensión:	55 MPa (8 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 1%

lineal. Su propiedad extraordinaria es la transparencia excelente, que lo hace competir con el vidrio en aplicaciones ópticas. Algunos ejemplos incluyen lentes para las luces traseras de automóviles, instrumentos ópticos y ventanas de los aviones. Su limitación es que, en comparación con el vidrio, tiene una resistencia a las rayaduras mucho menor. Otros usos del PMMA incluyen ceras para pisos y pinturas de emulsión de látex. Otro uso importante de los acrílicos es el de fibras para textiles; el poliacrilonitrilo es un ejemplo que resulta más conocido por sus nombres comerciales de Orlon (DuPont) y Acrilán (Monsanto).

Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno El ABS es un plástico de uso en la ingeniería por su combinación excelente de propiedades mecánicas, algunas de las cuales se enlistan en la tabla 8.3c. El ABS es un terpolímero de dos fases; una es la de copolímero duro de estireno-acrilonitrilo, y la otra es de copolímero de estireno-butadieno similar al caucho. El nombre del plástico se deriva de los tres monómeros iniciales, que están mezclados en proporciones diferentes. Las aplicaciones comunes incluyen componentes para automóviles, aparatos, máquinas de oficina, y tubos y accesorios.

Celulosas La ***celulosa*** $(C_6H_{10}O_5)$ es un polímero carbohidratado que ocurre de manera común en la naturaleza. La madera y fibras de algodón, que son las fuentes principales de celulosa para la industria, contienen alrededor de 50% y 95% del polímero, respectivamente. Cuando la celulosa se disuelve y precipita durante el procesamiento químico, el polímero que resulta se denomina ***celulosa regenerada***. Cuando ésta se produce como fibra para ropa se conoce como ***rayón*** (por supuesto, el algodón mismo se emplea mucho como fibra para telas). Cuando se produce como película delgada se conoce como ***celofán***, material común para empacar. La celulosa en sí no puede usarse como termoplástico debido a que con el aumento de temperatura se descompone antes de fundirse. Sin embargo, puede combinarse con distintos componentes para formar varios plásticos de importancia comercial; dos ejemplos son el ***acetato de celulosa*** (CA) y la ***celulosa de acetato butirato*** (CAB). El CA, cuyos datos se dan en la tabla 8.3d, se produce en forma de hojas (para envolver), película (para fotografía) y piezas moldeadas. El CAB es un material mejor para

TABLA 8.3 (*continúa*): *c*) acrilonitrilo-butadieno-estireno.

Polímero:	Terpolímero de acrilonitrilo (C_3H_3N), butadieno (C_4H_6), y estireno (C_8H_8).		
Símbolo:	ABS	Resistencia a la tensión:	50 MPa (7 000 lb/in^2)
Método de polimerización:	Adición	Elongación:	10% a 30%
Grado de cristalinidad:	Ninguno (amorfo)	Gravedad específica:	1.06
Módulo de elasticidad:	2 100 MPa (300 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 3%

TABLA 8.3 (*continúa*): *d*) celulosas.

Polímero representativo:	acetato de celulosa $(C_6H_9O_5\text{–}COCH_3)_n$		
Símbolo:	CA	Elongación:	10% a 50%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.3
Grado de cristalinidad:	Amorfo	Temperatura de transición al vidrio:	105 °C (221 °F)
Módulo de elasticidad:	2 800 MPa (400 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	306 °C (583 °F)
Resistencia a la tensión:	30 MPa (4 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

TABLA 8.3 (*continúa*): *e*) fluoropolímeros

Polímero representativo:	Politetrafluoretileno $(C_2F_4)_n$		
Símbolo:	PTFE	Elongación:	100% a 300%
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	2.2
Grado de cristalinidad:	Cristalino en alrededor de 95%	Temperatura de transición al vidrio:	127 °C (260 °F)
Módulo de elasticidad:	425 MPa (60 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	327 °C (620 °F)
Resistencia a la tensión:	20 MPa (2 500 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

Recopilada de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

moldear que el CA, y tiene mayor resistencia al impacto, menor absorción de humedad y compatibilidad mejor con otros plastificadores. Los termoplásticos de celulosa tienen una participación en el mercado de alrededor de 1%.

Fluoropolímeros El ***politetrafluoretileno*** (PTFE), comúnmente conocido como ***Teflón***, abarca a cerca de 85% de la familia de los polímeros llamados ***fluoropolímeros***, en la que átomos de F remplazan a los átomos de H en la cadena de hidrocarburos. El PTFE es resistente en extremo al ataque químico y ambiental, no le afecta el agua, posee buenas propiedades eléctricas, buena resistencia al calor y coeficiente de fricción muy bajo. Estas dos últimas propiedades han extendido su uso en trastos de cocina antiadhesivos. Otras aplicaciones que se basan en la misma propiedad incluyen cojinetes que no requieren lubricación y otros componentes parecidos. El PTFE también tiene aplicaciones en equipo químico y de procesamiento de comida.

Poliamidas Una familia importante de polímeros que forma uniones de amidas (CO–NH) características durante la polimerización es la de las poliamidas (PA). Los miembros más importantes de la familia de las PA son los ***nylons***, de los que los dos principales grados son el nylon 6 y el nylon 6,6 (los números son códigos que indican el número de átomos de carbono en el monómero). Los datos que se dan en la tabla 8.3f son para el nylon-6,6, que se creó en DuPont en la década de 1930. Las propiedades del naylon-6, creado en Alemania, son similares. El nylon es fuerte, muy elástico, inflexible, resistente a la abrasión y autolubricante. A temperaturas alrededor de 125 ºC (250 ºF) conserva buenas propiedades mecánicas. Una desventaja es que absorbe agua y esto implica la degradación de sus propiedades. La mayoría de las aplicaciones del nylon (cerca de 90%) son en fibras para tapetes, ropa y cuerdas de neumáticos. El resto (10%) es para componentes de ingeniería; es común que el nylon sea un buen sustituto de los metales en cojinetes, engranes y piezas similares en las que se necesita resistencia y fricción baja.

Un segundo grupo de poliamidas es el de las ***aramidas*** (poliamidas aromáticas), de las que el ***Kevlar*** (nombre comercial de DuPont) ha ganado importancia como fibra para plásticos reforzados. La razón del interés en el Kevlar es que tiene la misma resistencia que el acero con 20% de su peso.

Policarbonato El policarbonato (PC) es notable por sus propiedades mecánicas excelentes en general, que incluyen tenacidad elevada y buena resistencia al escurrimiento plástico. Es uno de los termoplásticos mejores en cuanto a resistencia al calor y se puede usar a temperaturas cercanas a los 125 ºC (250 ºF). Además es transparente y resiste al fuego.

TABLA 8.3 (*continúa*): *f*) poliamidas.

Polímero representativo:	nylon-6,6 $((CH_2)_6(CONH)(CH_2)_4)_n$		
Símbolo:	PA-6,6	Elongación:	300%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.14
Grado de cristalinidad:	Altamente cristalino	Temperatura de transición al vidrio:	50 °C (122 °F)
Módulo de elasticidad:	700 MPa (100 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	260 °C (500 °F)
Resistencia a la tensión:	70 MPa (10 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	1% para todas las poliamidas

TABLA 8.3 (*continúa*): g) policarbonato.

Polímero:	Policarbonato $(C_3H_6(C_6H_4)_2CO_3)_n$		
Símbolo:	PC	Elongación:	110%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.2
Grado de cristalinidad:	Amorfo	Temperatura de transición al vidrio:	150 °C (302 °F)
Módulo de elasticidad:	2 500 MPa (350 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	230 °C (446 °F)
Resistencia a la tensión:	65 MPa (9 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

Sus aplicaciones incluyen piezas moldeadas para maquinaria, carcasas para máquinas de oficina, impulsores de bombas, cascos de seguridad y discos compactos (por ejemplo, audio, video y computadora). También se usa mucho en aplicaciones de cristales (ventanas y parabrisas).

Poliésteres El poliéster constituye una familia de polímeros formada por las uniones características del éster (CO–O). Son termoplásticos o termofijos, lo que depende si ocurre entrecruzamiento. De los poliésteres termoplásticos, un ejemplo representativo es el ***tereftalato de polietileno*** (PET), cuyos datos se presentan en la tabla. Puede ser amorfo o estar cristalizado parcialmente (hasta cerca de 30%), lo que depende de cómo se enfrió después de darle forma. El enfriamiento rápido favorece el estado amorfo, que es muy transparente. Las aplicaciones importantes incluyen contenedores de bebidas moldeados por soplado, películas fotográficas y cintas magnéticas de grabación. Además, el PET se usa mucho como fibras para telas. Las fibras de poliéster tienen absorción baja de humedad y buena recuperación ante la deformación, dos características que lo hacen ideal para prendas de vestir tipo “lavar y usar” que resisten ser exprimidas. Las fibras de PET casi siempre están mezcladas con algodón o lana. Algunos nombres familiares de fibras de poliéster incluyen el Dacron (DuPont), Fortrel (Celanese) y Kodel (Eastman Kodak).

Polietileno El polietileno (PE) se sintetizó por vez primera en la década de 1930, y hoy abarca el volumen más grande de todos los plásticos. Las características que hacen atractivo al PE como material de ingeniería son su costo bajo, y que es inerte químicamente y fácil de procesar. El polietileno se encuentra disponible en varios grados, los más comunes de los cuales son el ***polietileno de baja densidad*** (LPDE) y el ***polietileno de alta densidad*** (HDPE). El grado de densidad baja es un polímero muy ramificado con cristalinidad y densidad bajas. Las aplicaciones incluyen hojas, películas y aislamiento de alambres. El HDPE tiene una estructura más lineal, con cristalinidad y densidad elevadas. Estas diferencias hacen al HDPE más rígido y fuerte, y le dan una temperatura de fusión más alta. El HDPE se emplea para producir botellas, tubos y enseres domésticos. Ambos grados se procesan con la mayoría de métodos para conformar polímeros (véase el capítulo 13). En la tabla 8.3i se dan las propiedades de los dos grados.

Polipropileno A partir de su introducción a finales de la década de 1950, el polipropileno (PP) se ha convertido en un plástico importante, en especial para el moldeo por inyección.

TABLA 8.3 (*continúa*): *h*) poliésteres (termoplásticos).

Polímero representativo:	Tereftalato de polietileno $(C_2H_4–C_8H_4O_4)_n$		
Símbolo:	PET	Elongación:	200%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.3
Grado de cristalinidad:	Amorfo a 30% cristalino	Temperatura de transición al vidrio:	70 °C (158 °F)
Módulo de elasticidad:	2 300 MPa (325 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	265 °C (509 °F)
Resistencia a la tensión:	55 MPa (8 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 2%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.3 (*continúa*): *i*) polietileno.

Polietileno:	$(C_2H_4)_n$ (densidad baja)	$(C_2H_4)_n$ (densidad alta)
Símbolo:	LDPE	HDPE
Método de polimerización:	Adición	Adición
Grado de cristalinidad:	Común 55%	Común 92%
Módulo de elasticidad:	140 MPa (20 000 lb/in^2)	700 MPa (100 000 lb/in^2)
Resistencia a la tensión:	15 MPa (2 000 lb/in^2)	30 MPa (4 000 lb/in^2)
Elongación:	100-500%	20-100%
Gravedad específica:	0.92	0.96
Temperatura de transición al vidrio:	–100 °C (–148 °F)	–115 °C (–175 °F)
Temperatura de fusión:	115 °C (240 °F)	135 °C (275 °F)
Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 20%	Alrededor de 15%

El PP se sintetiza en las estructuras isotáctica, sindiotáctica o atáctica, la primera de las cuales es la más importante y son sus características las que se presentan en la tabla. Es el más ligero de los plásticos y su resistencia a peso es elevada. El PP se compara con frecuencia con el HDPE debido a que su costo y muchas de sus propiedades son similares. Sin embargo, el punto de fusión elevado del polipropileno permite ciertas aplicaciones en las que se prefiere el uso del polietileno, por ejemplo, en componentes que deben esterilizarse. Otras aplicaciones son las piezas moldeadas por inyección para automóviles y enseres domésticos, y productos de fibra para alfombras. Una aplicación especial del polipropileno son las bisagras de una pieza que pueden sujetarse a un número elevado de ciclos de flexión sin que fallen.

Poliestireno Hay varios polímeros, copolímeros y terpolímeros que se basan en el monómero del estireno (C_8H_8), de los que el mayor volumen corresponde al poliestireno (PS). Es un homopolímero lineal con estructura amorfa que en general resulta notable por su fragilidad. El PS es transparente, se colorea con facilidad y se moldea con rapidez, pero a temperaturas elevadas se degrada y varios solventes lo disuelven. Debido a su fragilidad, algunos grados de PS contienen de 5% a 15% de caucho, tipos para los que se emplea el término ***poliestireno de alto impacto*** (HIPS). Tienen tenacidad alta, pero son pobres en transparencia y resistencia a la tensión. Además de las aplicaciones en moldeo por inyección (por ejemplo, juguetes moldeados, enseres domésticos), el poliestireno también se emplea para empacar, en forma de espumas de PS.

Cloruro de polivinilo El cloruro de polivinilo (PVC) es un plástico muy usado cuyas propiedades varían si se combinan aditivos con el polímero. En particular, se emplean plastificadores para obtener termoplásticos que van del PVC rígido (sin plastificadores) a PVC flexible (proporciones elevadas de plastificador). El rango de propiedades hace del PVC un polímero versátil, con aplicaciones que incluyen tubos rígidos (que se utilizan en la construcción y sistemas de agua, drenaje e irrigación), accesorios, aislamiento de alambres y cables, películas, hojas, empaque de comida, pisos y juguetes. El PVC en sí es relativamente inestable ante el calor y la luz, y deben agregarse estabilizadores para mejorar su resistencia en esas condiciones ambientales. Es necesario tener cuidado en la

TABLA 8.3 (*continúa*): *j*) polipropileno.

Polímero:	Polipropileno $(C_3H_6)_n$		
Símbolo:	PP	Elongación:	10%–500%
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	0.90
Grado de cristalinidad:	Alto, varía con el procesamiento	Temperatura de transición al vidrio:	–20 °C (–4 °F)
Módulo de elasticidad:	1 400 MPa (200 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	176 °C (249 °F)
Resistencia a la tensión:	35 MPa (5 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 13%

[a] La elongación depende de los aditivos.

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.3 (*continúa*): *k*) poliestireno.

Polímero:	Poliestireno $(C_8H_8)_n$		
Símbolo:	PS	Elongación:	1%
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	1.05
Grado de cristalinidad:	Ninguno (amorfo)	Temperatura de transición al vidrio:	100 °C (212 °F)
Módulo de elasticidad:	3 200 MPa (450 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	240 °C (464 °F)
Resistencia a la tensión:	50 MPa (7 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 10%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.3 (*continúa*): *l*) Cloruro de polivinilo.

Polímero:	Cloruro de polivinilo $(C_2H_3CL)_n$		
Símbolo:	PVC	Elongación:	2% sin plastificador
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	1.40
Grado de cristalinidad:	Ninguno (estructura amorfa)	Temperatura de transición al vidrio:	81 °C (178 °F)
Módulo de elasticidad:	2 800 MPa (400 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	212 °C (414 °F)
Resistencia a la tensión:	40 MPa (6 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 16%

[a] Sin plastificador.
Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

producción y manejo del monómero del cloruro de vinilo que se emplea para polimerizar al PVC, debido a su naturaleza cancerígena.

8.3 POLÍMEROS TERMOFIJOS

Los polímeros termofijos (TS) se distinguen por su estructura muy entrecruzada. En realidad, la pieza formada (por ejemplo, la manija de un recipiente o la cubierta de los interruptores eléctricos) se convierte en una sola macromolécula. Los termofijos siempre son amorfos y no presentan temperatura de transición al vidrio. En esta sección se estudian las características generales de los plásticos TS y se identifican los materiales importantes de esta categoría.

8.3.1 Propiedades y características generales

Debido a las diferencias de química y estructura molecular, las propiedades de los plásticos termofijos son distintas de las de los termoplásticos. En general, los termofijos son 1) más rígidos, su módulo de elasticidad es de dos a tres veces más grande; 2) frágiles, virtualmente no poseen ductilidad; 3) menos solubles en solventes comunes; 4) capaces de resistir temperaturas de uso elevadas; y 5) no son capaces de volverse a fundir; en vez de ello, se degradan o queman.

Las diferencias en las propiedades de los plásticos TS son atribuibles al entrecruzamiento, que forma una estructura estable en lo térmico, tridimensional y de enlaces covalentes en el interior de la molécula. El entrecruzamiento ocurre de tres maneras [7]:

1. ***Sistemas activados por temperatura***: En los sistemas más comunes, los cambios los ocasiona el calor que se suministra durante la operación de dar forma a la pieza (por ejemplo, moldeo). El material de inicio es un polímero lineal en forma granular que suministra la planta química. Conforme se agrega calor, el material se suaviza para ser moldeado; el calentamiento adicional da como resultado el entrecruzamiento del polímero. El término ***termofijo*** se aplica con más frecuencia a esta clase de polímeros.
2. ***Sistemas activados por catalizadores***: En estos sistemas, el entrecruzamiento ocurre cuando se agregan al polímero cantidades pequeñas de un catalizador, que está en forma líquida. Sin el catalizador, el polímero permanece estable; una vez que se combina con aquél, cambia a forma sólida.

TABLA 8.4 Polímeros termofijos de importancia comercial: *a*) amino resinas.

Polímero representativo:	Melamina-formaldehído		
Monómeros:	Melamina ($C_3H_6N_6$) y formaldehído (CH_2O)		
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Elongación:	Menos de 1%
Módulo de elasticidad:	9 000 MPa (1 300 000 lb/in²)	Gravedad específica:	1.5%
Resistencia a la tensión:	50 MPa (7 000 lb/in²)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 4% para urea-formaldehído y melamina-formaldehído.

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

3. ***Sistemas activados por mezcla***: Ejemplos de estos sistemas son la mayoría de epóxicos. La mezcla de dos productos químicos provoca una reacción que forma un polímero sólido entrecruzado. En ocasiones se emplean temperaturas elevadas para acelerar las reacciones.

Las reacciones químicas que se asocian con el entrecruzamiento se denominan ***curado*** o ***fraguado***. El curado se efectúa en plantas de fabricación que dan forma a las piezas, a diferencia de las plantas químicas que suministran al fabricante los materiales de inicio.

8.3.2 Polímeros termofijos importantes

Los plásticos termofijos no se usan tanto como los termoplásticos, quizá por las complicaciones adicionales del procesamiento que involucra el curado de los polímeros TS. El volumen mayor de termofijos son las resinas fenólicas, cuyo volumen anual es alrededor de 6% del total de plásticos en el mercado. Esto es significativamente menos que el polietileno, el termoplástico líder, cuyo volumen es de cerca de 35% del total. En la tabla 8.4 se presentan los datos técnicos para estos materiales. Los datos de participación en el mercado se refieren al total de plásticos (TP más TS).

Amino resinas Los plásticos amino, caracterizados por el grupo del amino (NH_2), consisten en dos polímeros termofijos, urea-formaldehído y melamina-formaldehído, que se producen por la reacción del formaldehído (CH_2O) ya sea con la urea ($CO(NH_2)_2$) o con la melamina ($C_3H_6N_6$), respectivamente. En cuanto a importancia comercial, las amino resinas están justo por debajo de las demás resinas de formaldehído, fenol-formaldehído, que se estudian enseguida. La ***urea-formaldehído*** compite con los fenoles en ciertas aplicaciones, en particular como cubierta (triplay) y tablero de partículas adhesivas. Las resinas también se emplean como un compuesto moldeador. Es un poco más caro que el material de fenol. El plástico de ***melamina-formaldehído*** es resistente al agua y se utiliza para trastos y como recubrimiento en mesas laminadas y contracubiertas (Formica es un nombre comercial de Cyanamide Co.). Cuando se emplean como materiales moldeadores, los plásticos amino por lo general contienen proporciones significativas de rellenos, tales como la celulosa.

Epóxicos Las resinas epóxicas se basan en un grupo químico denominado ***epóxidos***. La formulación más sencilla del epóxido es el óxido de etileno (C_2H_3O). La epiclorohidrina (C_3H_5OCl) es un epóxido que se emplea mucho más para producir resinas epóxicas. Si no están curados, los epóxidos tienen un grado bajo de polimerización. Para incrementar el peso

TABLA 8.4 (*continúa*): *b*) epóxicos.

Ejemplo de química:	Epiclorohidrina (C_3H_5OCl) más un agente de curado como la trietilamina (C_6H_5–CH_2N–$(CH_3)_2$)		
Método de polimerización:	Condensación	Elongación	0%
Módulo de elasticidad:	7 000 MPa (1 000 000 lb/in²)	Gravedad específica:	1.1
Resistencia a la tensión:	70 MPa (10 000 lb/in²)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 1%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.4 (*continúa*): *c*) fenol-formaldehído.

Ingredientes del monómero:	Fenol (C_6H_5OH) y formaldehído (CH_2O)		
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Elongación:	Menos de 1%
Módulo de elasticidad:	7 000 MPa (1 000 000 lb/in²)	Gravedad específica:	1.4
Resistencia a la tensión:	70 MPa (10 000 lb/in²)	Participación aproximada en el mercado:	6%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

molecular y el entrecruzamiento, debe usarse el epóxido, el agente de curado. Los posibles agentes de curado incluyen las poliaminas y los anhídridos de ácido. Los epóxicos curados son notables por su resistencia, adhesividad y resistencia al calor y al ataque químico. Las aplicaciones incluyen recubrimientos de superficies, pisos industriales, compuestos de fibra de vidrio reforzada y adhesivos. Las propiedades aislantes de los epóxicos termofijos los hacen útiles en varias aplicaciones electrónicas, tales como el encapsulamiento de circuitos integrados y la laminación de tarjetas de circuitos impresos.

Fenólicos El fenol (C_6H_5OH) es un compuesto ácido que reacciona con los aldehídos (alcoholes deshidrogenados), de los que el más reactivo es el formaldehído (CH_2O). El ***fenol-formaldehído*** es el más importante de los polímeros fenólicos; empezó a comercializarse alrededor de 1900 con el nombre comercial de ***bakelita***. Casi siempre se combina con rellenos tales como el aserrín, las fibras de celulosa y algunos minerales, cuando se emplea como material para moldear. Es frágil, posee buenas estabilidades térmica, química y dimensional. Su capacidad de aceptar colorantes es limitada: sólo está disponible en colores oscuros. Los productos moldeados constituyen únicamente cerca de 10% del total de fenoles que se usan. Otras aplicaciones incluyen adhesivos para madera laminada (triplay), tarjetas de circuitos impresos, contracubiertas y materiales de unión para frenos y ruedas abrasivas.

Poliésteres Los poliésteres, que contienen las uniones características de los ésteres (CO–O), son termofijos así como termoplásticos (véase la sección 8.2). Los poliésteres termofijos se emplean mucho en plásticos reforzados (compuestos) para fabricar objetos grandes tales como tubos, tanques, cascos de lanchas, piezas de carrocerías automotrices y paneles para la construcción. También se utilizan en diversos procesos de moldeo para producir piezas pequeñas. La síntesis del polímero inicial involucra la reacción de un ácido o anhídrido tal como el anhídrido maleico ($C_4H_2O_3$) con un glicol como el etilenglicol ($C_2H_6O_2$). Esto produce un ***poliéster insaturado*** de peso molecular relativamente bajo (MW = 1000 a 3000). Este ingrediente se mezcla con un monómero capaz de polimerizarse y entrecruzarse con el poliéster. El estireno (C_8H_8) se usa comúnmente para este propósito, en proporciones de 30% a 50%. Se agrega un tercer componente, denominado inhibidor, para impedir el entrecruzamiento prematuro. Esta mezcla forma el sistema de resina de poliéster que se suministra al fabricante. Los poliésteres se curan ya sea con calor (sistemas activados por temperatura) o por medio de un catalizador que se agrega a la resina de poliéster (sistema activado por catalizador). El curado se realiza en el momento de la fabricación (proceso de moldeo o de otro tipo) y da como resultado el entrecruzamiento del polímero.

Una clase importante de poliésteres son las resinas ***alquídicas*** (el nombre es una abreviatura y combinación de las palabras alcohol y ácido, y el cambio de algunas letras).

TABLA 8.4 (*continúa*): *d*) poliéster insaturado.

Ejemplo de química:	Anhídrido maleico ($C_4H_2O_3$) y etilenglicol ($C_2H_6O_2$) más estireno (C_8H_8)		
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Elongación:	0%
Módulo de elasticidad:	7 000 MPa (1 000 000 lb/in²)	Gravedad específica:	1.1
Resistencia a la tensión:	30 MPa (40 000 lb/in²)	Participación aproximada en el mercado:	3%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.4 (*continúa*): *e*) poliuretano.

Polímero:	El poliuretano se forma por la reacción de un poliol y un isocianato. La química varía mucho.		
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Elongación:	Depende del entrecruzamiento.
Módulo de elasticidad:	Depende de la química y el procesamiento.	Gravedad específica:	1.2
Resistencia a la tensión:	30 MPa (4 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 4%, incluidos elastómeros

[a] Común para poliuretano muy entrecruzado.
Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

Se emplean sobre todo como bases de pinturas, barnices y lacas. También están disponibles compuestos alquídicos para moldeo, pero sus aplicaciones son limitadas.

Poliuretanos Incluyen una familia grande de polímeros, caracterizados todos por el grupo del uretano (NHCOO) en su estructura. La química de los poliuretanos es compleja y en la familia existen muchas variedades de ella. El rasgo característico es la reacción de un ***poliol***, cuyas moléculas contienen grupos de hidroxilos (OH), tales como el butileno éter glicol ($C_4H_{10}O_2$), y un ***isocianato***, como el diisocianato difenilmetano ($C_{15}H_{10}O_2N_2$). Según las variaciones de su química, entrecruzamiento y procesamiento, los poliuretanos pueden ser materiales termoplásticos, termofijos o elastoméricos, de los que estos dos últimos son los que tienen mayor importancia comercial. La aplicación principal del poliuretano es en espumas. Éstas varían entre elastoméricas y rígidas, y las últimas tienen un entrecruzamiento mayor. Las espumas rígidas se emplean como material de relleno en paneles huecos para la construcción y en las paredes de refrigeradores. En estos tipos de aplicaciones, el material proporciona un aislamiento térmico excelente, da rigidez a la estructura y no absorbe agua en cantidades significativas. Muchas pinturas, barnices y recubrimientos similares se basan en sistemas de uretano. En la sección 8.4 se estudian los elastómeros de poliuretano.

Silicones Éstos son polímeros inorgánicos y seminorgánicos, que se distinguen por la presencia de una unión repetitiva de siloxano (–Si–O–) en su estructura molecular. Una formulación común combina el radical metilo (CH_3) con (SiO) en distintas proporciones para obtener la unidad repetitiva, $((CH_3)_m$–SiO), donde ***m*** establece la proporcionalidad. Según las variaciones en su composición y procesamiento, los polisiloxanos se producen en tres formas: 1) fluidos, 2) elastómeros y 3) resinas termofijas. Los fluidos 1) son polímeros de peso molecular bajo que se usan como lubricantes, pulidores, ceras y otros líquidos; no son realmente polímeros en el sentido en que se emplea el término en este capítulo; no obstante, son productos de importancia comercial. Los elastómeros de silicón 2), que se estudian en la sección 8.4, y los termofijos 3), que se analizan aquí, son entrecruzados. Cuando el entrecruzamiento es muy alto, los polisiloxanos forman sistemas rígidos de resina que se emplean para pinturas, barnices y otros recubrimientos, y en laminaciones tales como las tarjetas para circuitos impresos. También se utilizan como materiales para moldearse y obtener piezas eléctricas. El curado se lleva a cabo por medio de calentamiento o dejando que se evaporen los solventes que contienen los polímeros. Los silicones son notables por su buena resistencia al calor y por ser repelentes al agua, pero su resistencia mecánica no es tan grande como la de otros polímeros entrecruzados. Los datos de la tabla 8.4f son para un polímero de silicón termofijo.

TABLA 8.4 (*continúa*): *f*) resinas de silicón termofijo.

Ejemplo de química:	$((CH_3)_6-SiO)_n$		
Método de polimerización:	Por lo general de etapas (condensación)	Elongación:	0%
Resistencia a la tensión:	30 MPa (4 000 lb/in^2)	Gravedad específica:	1.65
		Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

8.4 ELASTÓMEROS

Los elastómeros son polímeros capaces de desarrollar una deformación elástica grande si se les sujeta a esfuerzos relativamente pequeños. Algunos elastómeros presentan extensiones de 500% o más y regresan a su forma original. El término más frecuente para un elastómero es, por supuesto, caucho. Los cauchos se dividen en dos categorías: 1) caucho natural, derivado de ciertos vegetales; y 2) elastómeros sintéticos, que se obtienen con procesos de polimerización similares a los que se emplean para los polímeros termoplásticos y termofijos. Antes de estudiar los cauchos naturales y sintéticos, se analizarán las características generales de los elastómeros.

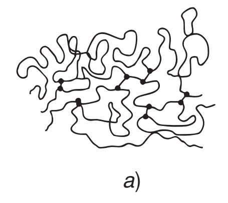
8.4.1 Características de los elastómeros

Los elastómeros consisten en moléculas de cadena larga entrecruzadas (como los polímeros termofijos). Deben sus propiedades elásticas tan impresionantes a la combinación de dos características: 1) las moléculas largas están dobladas estrechamente cuando no están estiradas, y 2) el grado de entrecruzamiento está muy por debajo del de los termofijos. En la figura 8.12a se ilustran estas características, y se aprecia una molécula doblada estrechamente no sujeta a esfuerzo.

Cuando el material se estira, las moléculas se ven forzadas a desenrollarse y se enderezan, como se aprecia en la figura 8.12b. La resistencia natural de las moléculas para desenrollarse proporciona el módulo de elasticidad inicial del material agregado. Conforme se experimenta más estiramiento, los enlaces covalentes de las moléculas entrecruzadas comienzan a jugar un papel mayor en el módulo, y la rigidez se incrementa, como se ilustra en la figura 8.13. Con mayor entrecruzamiento, el elastómero se vuelve más rígido y su módulo de elasticidad es más lineal. Estas características se ilustran en la figura por medio de curvas esfuerzo-deformación para tres grados de caucho: natural crudo, cuyo entrecruzamiento es muy bajo; curado (vulcanizado) con entrecruzamiento de medio a bajo; y duro (ebonita), cuyo alto grado de entrecruzamiento lo transforma en un plástico termofijo.

Para que un polímero presente propiedades elastoméricas debe ser amorfo en condiciones sin estiramiento, y su temperatura debe estar por arriba de T_g. Si se encuentra por debajo de la temperatura de transición al vidrio, el material es duro y frágil; por arriba de T_g el polímero está en estado "de caucho". Cualquier polímero termoplástico amorfo tendrá propiedades elastoméricas por encima de T_g, durante un tiempo corto, porque sus moléculas lineales siempre están enrolladas hasta cierto grado, lo que permite la extensión elástica. Es la ausencia de entrecruzamiento en los polímeros TP lo que les impide ser elásticos en verdad; en lugar de ello, muestran un comportamiento viscoelástico.

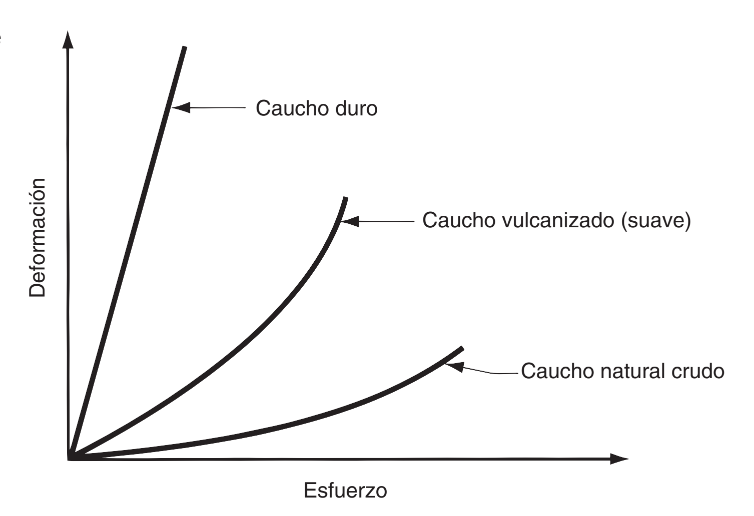
En la mayoría de elastómeros comunes de hoy día, se requiere la cura para que se dé el entrecruzamiento. El término que se emplea para el curado en el contexto del caucho natural (y algunos sintéticos) es el de ***vulcanización***, que involucra la formación de entrecruzamientos químicos entre las cadenas del polímero. El entrecruzamiento común en el caucho es de 1 a 10 uniones por cien átomos de carbono en la cadena de polímero lineal, lo que depende de la rigidez que se desea para el material. Esto es considerablemente menos que el grado de entrecruzamiento de los termofijos.



σ
σ
b)

FIGURA 8.12 Modelo de moléculas largas de elastómero, con grado bajo de entrecruzamiento: *a*) sin estirar y *b*) sujetas a un esfuerzo de tensión.

FIGURA 8.13 Aumento de la rigidez como función del esfuerzo para tres grados de caucho: natural, vulcanizado y duro.



Un método alternativo de curado involucra el empleo de químicos de inicio que reaccionan cuando se mezclan (a veces requieren de un catalizador o de calor) para formar elastómeros con entrecruzamientos relativamente raros entre las moléculas. Estos cauchos sintéticos se conocen como ***sistemas de elastómeros reactivos***. Ciertos polímeros que se curan por este medio, como los uretanos y silicones, se clasifican ya sea como termofijos o como elastómeros, lo que depende del grado de entrecruzamiento que se logra durante la reacción.

Una clase relativamente nueva de elastómeros, llamados ***elastómeros termoplásticos***, posee propiedades elastoméricas que resultan de la mezcla de dos fases, ambas termoplásticas. Una está por arriba de su T_g a temperatura ambiente, mientras que la otra está por debajo de T_g. Así, se tiene un polímero que incluye regiones de caucho suave entremezcladas con partículas duras que actúan como entrecruzamientos. El material compuesto es elástico en cuanto a su comportamiento mecánico, aunque no tan extensible como la mayoría de los demás elastómeros. Debido a que ambas fases son termoplásticas, el material agregado se puede calentar por arriba de su T_m para darle forma, con procesos que por lo general son más económicos que los que se emplean para el caucho.

En las dos secciones que siguen se estudian los elastómeros. La primera trata del caucho natural y la manera en que se vulcaniza para crear un material comercial útil; en la segunda se examinan los cauchos sintéticos.

8.4.2 Caucho natural

El caucho natural (CN) consiste sobre todo en poliisopreno, un polímero del isopreno (C_5H_8) de peso molecular alto. Se deriva del látex, sustancia lechosa producida por varias plantas, la más importante de las cuales es el árbol del hule (*Hevea brasiliensis*), que crece en los climas tropicales (véase la nota histórica 8.2). El látex es una emulsión en agua de poliisopreno (cerca de un tercio del peso), más otros ingredientes. El caucho se extrae del látex por medio de distintos métodos (por ejemplo, coagulación, secado y rocío) que eliminan el agua.

Nota histórica 8.2 *Caucho natural*

El primer uso del caucho natural parece haber sido en la forma de pelotas deportivas de los indígenas de América Central y del Sur, hace al menos 500 años. Colón observó eso durante su segundo viaje al Nuevo Mundo en 1493-1496. Las pelotas estaban hechas de goma seca del árbol del caucho. Los primeros hombres blancos de América del Sur llamaron al árbol ***caoutchouc***, que era su manera de pronunciar el nombre que los indios le daban. El nombre ***rubber* (*caucho*)**

proviene del químico inglés J. Priestley, quien descubrió (alrededor de 1770) que la goma de caucho podía borrar cualquier marca de lápiz. Los primeros artículos de caucho eran menos que satisfactorios: en el verano se derretían y en el invierno se endurecían. Una de las personas que estaba en el negocio de manufacturar y vender caucho era Charles Goodyear. Al reconocer las deficiencias del material natural, experimentó maneras de mejorar sus propiedades y descubrió que podía curarse por medio de calentarlo con azufre. Esto lo hizo en 1839 y patentó el proceso, que posteriormente se llamó ***vulcanización***, en 1844.

La vulcanización y la demanda emergente de productos de caucho llevaron a un crecimiento muy grande de la producción de este material y de la industria que lo procesaba. En 1876, Henry Wickham obtuvo miles de semillas del árbol del hule de la jungla brasileña y las plantó en Inglaterra: los retoños fueron trasplantados después a Ceilán y Malasia (en aquel entonces colonias británicas) para dar origen a plantaciones de caucho. Muy pronto, otros países de la región siguieron el ejemplo británico. El sureste de Asia se volvió la base de la industria del caucho.

En 1888, el médico veterinario británico John Dunlop patentó las llantas neumáticas para bicicletas. Hacia el siglo XX, en Estados Unidos y Europa se desarrollaba la industria automotriz. Las industrias del automóvil y el caucho crecieron juntas hasta ocupar posiciones de importancia inimaginable.

El caucho natural crudo (sin vulcanizar) es pegajoso en agua caliente, rígido y frágil en la fría. Para formar un elastómero de propiedades útiles, el caucho natural debe vulcanizarse. Tradicionalmente, la vulcanización se ha llevado a cabo mezclando cantidades pequeñas de azufre y otros productos químicos con el caucho natural que luego se calientan. El efecto químico de la vulcanización es crear entrecruzamientos; el resultado mecánico es que se incrementan la resistencia y la rigidez, pero se mantiene la elasticidad. El marcado cambio de las propiedades ocasionado por la vulcanización se observa en las curvas de esfuerzo-deformación que se presentan en la figura 8.13.

El azufre por sí solo ocasiona entrecruzamientos, pero el proceso es lento y toma varias horas. Se agregan otros productos químicos durante la vulcanización para acelerar el proceso y obtener otros resultados benéficos. Asimismo, el caucho se puede vulcanizar con el empleo de productos diferentes del caucho. Hoy día, los tiempos del curado se han reducido mucho en comparación con el curado por medio de azufre de los primeros años.

Como material de ingeniería, el caucho vulcanizado es notable entre los elastómeros por su alta resistencia a la tensión, resistencia al corte, resiliencia (capacidad de recuperar su forma después de la deformación) y resistencia ante el desgaste y la fatiga. Su debilidad radica en que se degrada si se sujeta a calor, luz del sol, oxígeno, ozono y aceite. Algunas de estas limitaciones se reducen con el uso de aditivos. En la tabla 8.5 se presentan las propiedades comunes y otros datos para el caucho natural vulcanizado. La participación en el mercado es relativa respecto del volumen total anual del caucho natural más el sintético. El volumen del caucho es alrededor de 15% del mercado total de polímeros.

El mercado individual más grande para el caucho natural es el de las llantas (neumáticos) de automóviles. En las llantas, un aditivo importante es el negro de humo; refuerza el caucho y sirve para incrementar su resistencia a la tensión, el desgarre y la abrasión. Otros productos hechos con caucho son suelas de zapatos, cojinetes, sellos y componentes que absorben los golpes. En cada caso, el caucho tiene la composición necesaria para adquirir las propiedades específicas que requiera la aplicación. Además de negro de humo, se emplean otros aditivos en el caucho, y algunos de los elastómeros sintéticos incluyen arcilla, caolín, sílice, talco y carbonato de calcio, así como productos químicos que aceleran y facilitan la vulcanización.

TABLA 8.5 Características y propiedades comunes del caucho vulcanizado.

Polímero:	Poliisopreno		
Símbolo:	CN	Gravedad específica:	0.93
Módulo de elasticidad:	18 MPa (2 500 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	80 °C (180 °F)
		Límite inferior de temperatura:	−50 °C (−60 °F)
Resistencia a la tensión:	25 MPa (3 500 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	22%
Elongación:	700% antes de fallar		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9] y otras fuentes.

8.4.3 Cauchos sintéticos

Hoy día, el peso de los cauchos sintéticos es más del triple del natural. El desarrollo de estos materiales sintéticos fue motivado ampliamente por las guerras mundiales, cuando era difícil obtener el CN (véase la nota histórica 8.3). El más importante de los sintéticos es el caucho de estireno-butadieno (SBR), un copolímero del butadieno (C_4H_6) y el estireno (C_4H_8). Igual que para la mayoría de los demás polímeros, la materia prima predominante en los cauchos sintéticos es el petróleo. Aquí sólo se estudian los cauchos de mayor importancia comercial. En la tabla 8.6 se presentan los datos técnicos. Los datos de participación en el mercado se refieren al volumen total de cauchos naturales y sintéticos. Sólo es utilizable cerca de 10% del volumen total de la producción de caucho, por lo que los pesos totales que aparecen en las tablas 8.5 y 8.6 no suman 100%.

Nota histórica 8.3 *Cauchos sintéticos*

En 1826, Faraday reconoció que la fórmula del caucho natural era C_5H_8. Intentos posteriores efectuados durante muchos años para reproducir esta molécula por lo general no tuvieron éxito. En forma lamentable, fueron las guerras mundiales las que crearon la necesidad, que es la madre de la invención, del caucho sintético. En la Primera Guerra Mundial, los alemanes, imposibilitados de acceder al caucho natural, inventaron un sustituto basado en el metil. Este material no tuvo mucho éxito, pero marcó la primera etapa de la producción a gran escala del caucho sintético.

Después de la Primera Guerra Mundial, el precio del caucho natural era tan bajo que se abandonaron muchos intentos de fabricar el sintético. Sin embargo, los alemanes, que quizá preveían el conflicto por venir, renovaron los esfuerzos por desarrollarlo. La empresa I. G. Farben creó dos cauchos sintéticos, a principios de la década de 1930, a los que llamó Buna-S y Buna-N. El término ***buna*** se deriva del ***bu***tadieno (C_4H_6), que se ha vuelto el ingrediente fundamental de muchos cauchos sintéticos modernos, y de **Na**, el símbolo del sodio, que se emplea para acelerar o catalizar el proceso de polimerización (la palabra en alemán que significa sodio es **N*atrium***). El símbolo **S** en Buna-S se refiere al estireno. Buna-S es el copolímero que se conoce hoy día como ***caucho de estireno-butadieno***, o SBR. La N de Buna-N es un acrónimo de acriloNitrilo, y el caucho sintético se llama ***caucho de nitrilo*** en el uso cotidiano.

Otros trabajos incluyeron el efectuado por la compañía DuPont en Estados Unidos, que condujo al desarrollo del policloropreno, que se comercializó por vez primera en 1932 con el nombre de Dupreno, y que cambió más tarde a **N*eopreno***, que es la denominación actual. Era (y es) un caucho sintético más resistente a los aceites que el caucho natural.

Durante la Segunda Guerra Mundial, los japoneses cortaron el acceso de E.U. al abasto de caucho natural del sureste de Asia. La producción a gran escala del caucho sintético Buna-S comenzó en ese país. El gobierno federal prefería emplear el nombre **GR-S** (Caucho-estireno del Gobierno) en vez del de Buna-S (su nombre en alemán). Hacia 1944, Estados Unidos superaba a Alemania en la producción de SBR en una proporción de diez a uno. Desde la década de 1960, la producción mundial de cauchos sintéticos ha superado la de los naturales.

Caucho de butadieno El ***polibutadieno*** (BR) es importante sobre todo en combinación con otros cauchos. Está compuesto de caucho natural y estireno (el caucho de estireno-butadieno se estudia más adelante) y se emplea para producir llantas de autos. Solo, tiene características de resistencia al desgarre y a la tensión, y facilidad de procesamiento, que lo hacen menos que conveniente.

TABLA 8.6 Características y propiedades comunes de los cauchos sintéticos: a) caucho de butadieno.

Polímero:	Polibutadieno		
Símbolo:	BR	Gravedad específica:	0.93
Resistencia a la tensión:	15 MPa (2 000 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	100 °C (210 °F)
Elongación:	500% antes de fallar	Límite inferior de temperatura:	−50 °C (−60 °F)
		Participación aproximada en el mercado:	12%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *b*) caucho butilo.

Polímero:	Copolímero de isobutileno $(C_4H_8)_n$ e isopreno $(C_5H_8)_n$		
Símbolo:	PIB	Gravedad específica:	0.92
Módulo de elasticidad:	7 MPa (1 000 lb/in^2) con elongación del 300%.	Límite superior de temperatura:	110 ºC (220 ºF)
		Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
Resistencia a la tensión:	20 MPa (3 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 3%
Elongación:	700%		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

Caucho butilo El caucho butilo es un copolímero de poliisobutileno (98.99%) y poliisopreno (1-2%). Se vulcaniza para darle al caucho una permeabilidad muy baja al aire, lo que tiene aplicaciones en productos inflables tales como cámaras interiores, revestimientos de llantas sin cámaras y artículos deportivos.

Caucho cloropreno El policloropreno fue uno de los primeros cauchos sintéticos que se desarrollaron (a principios de la década de 1930). Hoy se conoce como ***Neopreno***, que es un caucho importante de propósitos especiales. Cristaliza cuando se estira para dar buenas propiedades mecánicas. El caucho cloropreno (CR) es más resistente que el CN a los aceites, al clima, al ozono, al calor y a las llamas (el cloro hace que este caucho se autoextinga), pero algo más caro. Sus aplicaciones incluyen mangueras para combustible (y otras partes automotrices), bandas transportadoras y juntas, pero no llantas.

Caucho etileno-propileno La polimerización de etileno y propileno con proporciones pequeñas (3-8%) de un monómero dieno produce el terpolímero etileno-propileno-dieno (EPDM), un caucho sintético útil. Las aplicaciones son para piezas sobre todo en la industria automotriz, más que para llantas. Otros usos que tiene son para aislar alambres y cables.

Caucho isopreno El isopreno se polimeriza para sintetizar un equivalente químico del caucho natural. El ***poliisopreno*** sintético (sin vulcanizar) es más suave y se moldea con mayor facilidad que el caucho natural. Las aplicaciones del material sintético son similares a las de su contraparte natural, y las llantas de automóvil constituyen el mercado individual más grande. También se emplea para zapatos, bandas transportadoras y compuestos para calafatear. El costo por unidad de peso es 35% más alto que el del CN.

TABLA 8.6 (*continúa*): *c*) caucho cloropreno (neopreno).

Polímero:	Policloropreno $(C_4H_5Cl)_n$		
Símbolo:	CR	Gravedad específica:	1.23
Módulo de elasticidad:	7 MPa (1 000 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	120 ºC (250 ºF)
		Límite inferior de temperatura:	220 ºC (210 ºF)
Resistencia a la tensión:	25 MPa (3 500 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	2%
Elongación:	500% antes de fallar		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *d*) caucho etileno-propileno-dieno.

Polímero representativo:	Terpolímero de etileno (C_2H_4), propileno (C_3H_6) y un monómero dieno (3-8%) para el entrecruzamiento.		
Símbolo:	EPDM	Gravedad específica:	0.86
Resistencia a la tensión:	15 MPa (2 000 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	150 ºC (300 ºF)
Elongación:	300% antes de fallar	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
		Participación aproximada en el mercado:	5%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *e*) caucho isopreno (sintético).

Polímero:	Poliisopreno $(C_3H_8)_n$		
Símbolo:	IR	Gravedad específica:	0.93
Módulo de elasticidad:	17 MPa (2 500 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	80 ºC (180 ºF)
		Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
Resistencia a la tensión:	25 MPa (3 500 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	2%
Elongación:	500% antes de fallar		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

Caucho nitrilo Éste es un copolímero vulcanizado de butadieno (50-75%) y acrilonitrilo (25-50%). Su nombre técnico es ***caucho butadieno-acrilonitrilo***. Tiene resistencia buena a la tensión y también a la abrasión, al aceite, a la gasolina y al agua. Estas propiedades lo hacen ideal para aplicaciones tales como tanques de gasolina y sellos, así como para calzado.

Poliuretanos Los poliuretanos termofijos (véase la sección 8.3.2) con entrecruzamientos mínimos son elastómeros, y es común que la mayoría se produzcan como espumas flexibles. En esta forma, se emplean mucho como materiales para vestiduras de muebles y asientos de autos. El poliuretano que no es esponja se moldea en productos que van desde suelas de zapatos hasta defensas de coches, con el entrecruzamiento ajustado para obtener las propiedades que se quiere para la aplicación. Sin entrecruzamiento, el material es un elastómero termoplástico que se moldea por inyección. Como elastómero o termofijo, se utiliza la reacción de moldeo por inyección y otros métodos para darle forma.

Silicones Igual que los poliuretanos, los silicones son elastómeros o termofijos, lo que depende del grado de entrecruzamiento. Los elastómeros de silicón son notables por el rango amplio de temperaturas en que pueden utilizarse. Su resistencia a los aceites es baja. Los silicones poseen varias composiciones químicas, la más común es la de ***polidimetilsiloxano*** (véase la tabla 8.6h). Para obtener propiedades mecánicas aceptables, los elastómeros de silicón deben reforzarse, por lo general con polvos finos de sílice. Debido a su costo elevado, se les considera cauchos de propósito especial para aplicaciones tales como juntas, sellos, aislamiento para alambres y cables, aparatos ortopédicos y bases de materiales para calafatear.

TABLA 8.6 (*continúa*): *f*) caucho nitrilo.

Polímero:	Copolímero de butadieno (C_4H_6) y acrilonitrilo (C_3H_3N)		
Símbolo:	BR	Gravedad específica:	1.00 (sin rellenos)
Módulo de elasticidad:	10 MPa (1 500 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	120 ºC (250 ºF)
Resistencia a la tensión:	30 MPa (4 000 lb/in^2)	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
Elongación:	500% antes de fallar	Participación aproximada en el mercado:	2%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *g*) poliuretano.

Polímero:	Poliuretano (la composición química varía)		
Símbolo:	PUR	Gravedad específica:	1.25
Módulo de elasticidad:	10 MPa (1 200 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	100 ºC (210 ºF)
		Límite inferior de temperatura:	−50ºC (−60 ºF)
Resistencia a la tensión:	60 MPa (8 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Se enlista como termofijo, véase la tabla 8.4e.
Elongación:	700% antes de fallar		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *h*) caucho de silicón.

Polímero representativo:	Polidimetilsiloxano $(SiO(CH_3)_2)_n$		
Símbolo:	VMQ	Gravedad específica:	0.98
Resistencia a la tensión:	10 MPa (1 500 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	230 ºC (450 ºF)
Elongación:	700% antes de fallar	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
		Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

Caucho estireno-butadieno El SBR es un copolímero aleatorio de estireno (alrededor de 25%) y butadieno (cerca de 75%). Originalmente se desarrolló en Alemania como caucho Buna-S antes de la Segunda Guerra Mundial. Hoy día, es el elastómero del que se produce el mayor peso, con 40% del total de todos los cauchos producidos (el caucho natural ocupa el segundo lugar por peso). Sus características atractivas son costo bajo, resistencia a la abrasión y mejor uniformidad que el CN. Cuando se refuerza con negro de humo y se vulcaniza, sus características y aplicaciones son similares a las del caucho natural. Su costo también es similar. Una comparación rigurosa revela que la mayoría de sus propiedades mecánicas, excepto la resistencia al desgaste, son inferiores que las del CN, pero su resistencia al envejecimiento térmico, al ozono, al clima y a los aceites es superior. Las aplicaciones incluyen llantas para carros, calzado y aislamiento de alambres y cables. Un material que se relaciona con el SBR es el bloque de copolímeros estireno-butadieno-estireno, elastómero termoplástico que se estudia a continuación.

Elastómeros termoplásticos Como ya se dijo, un elastómero termoplástico (TPE) es un termoplástico que se comporta como elastómero. Constituye una familia de polímeros que crece con rapidez en el mercado de elastómeros. Los TPE derivan sus propiedades elastoméricas no de los entrecruzamientos químicos, sino de las conexiones físicas entre las fases suave y dura que forman el material. Los elastómeros termoplásticos incluyen el bloque de copolímeros ***estireno-butadieno-estireno*** (SBS), en oposición al caucho estireno-butadieno (SBR), que es un copolímero aleatorio (véase la sección 8.1.2); ***poliuretanos termoplásticos; copolímeros de poliéster termoplástico*** y otros copolímeros y mezclas de polímeros. En la tabla 8.6j se presentan datos sobre el SBS. La química y estructura de estos materiales por lo general son complejas, e involucran materiales que son incompatibles, por lo que forman fases distintas con propiedades diferentes a temperatura ambiente. Debido a su termoplasticidad, los TPE no igualan a los elastómeros entrecruzados convencionales en cuanto a la resistencia a las temperaturas elevadas y al escurrimiento plástico. Sus aplicaciones comunes incluyen el calzado, bandas elásticas, tubería extruida, recubrimiento de alambres y de piezas moldeadas para automóviles y otros usos en los que se requieren propiedades elastoméricas. Los TPE no son apropiados para llantas.

TABLA 8.6 (*continúa*): *i*) caucho estireno-butadieno.

Polímero:	Copolímero de estireno (C_8H_8) y butadieno (C_4H_6)		
Símbolo:	SBR	Elongación:	700% antes de fallar
Módulo de elasticidad:	17 MPa (2 500 lb/in^2) con elongación de 300%.	Gravedad específica:	0.94
		Límite superior de temperatura:	110 ºC (230 ºF)
Resistencia a la tensión:	20 MPa (3 000 lb/in^2), reforzado	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
		Participación aproximada en el mercado:	Ligeramente menor de 30%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *j*) elastómeros termoplásticos (TPE).

Polímero representativo:	Bloque de copolímeros estireno-butadieno-estireno		
Símbolo:	SBS (también YSBR)	Gravedad específica:	1.0
Resistencia a la tensión:	14 MPa (2 000 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	65 ºC (150 ºF)
Elongación:	400%	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
		Participación aproximada en el mercado:	12%

8.5 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE POLÍMEROS

Los polímeros casi siempre son conformados con consistencia caliente y muy plástica. Las operaciones comunes son extrusión y moldeo. Por lo general, el moldeo de termofijos es más complicado debido a que requieren curarse (entrecruzarlos). Los termoplásticos son más fáciles de moldear y se dispone de una variedad grande de operaciones de moldeo para procesarlos (véase el capítulo 13). Aunque los plásticos tienden con facilidad a la forma del procesado neto, en ocasiones se requiere maquinarlos (véase el capítulo 22); las piezas plásticas se ensamblan en productos por medio de técnicas de unión permanentes tales como la soldadura (véase el capítulo 31), juntas adhesivas (sección 32.3) o ensamblado mecánico (véase el capítulo 33).

El procesamiento del caucho tiene una historia más larga que la de los plásticos, y las industrias asociadas con estos materiales de polímero han estado tradicionalmente separadas, aunque su procesamiento sea similar de muchos modos. En el capítulo 14 se estudia la tecnología de procesamiento del caucho.

REFERENCIAS

[1] Alliger, G. y Sjothum, I. J. (eds.), ***Vulcanization of Elastomers***, Krieger Publishing Company, Nueva York, 1978.

[2] Billmeyer, F. W., Jr., ***Textbook of Polymer Science***, 3a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.

[3] Blow, C. M. y Hepburn, C., ***Rubber Technology and Manufacture***, 2a. ed., Butterworth Scientific, Londres, 1982.

[4] Brandrup, J. e Immergut, E. E. (eds.), ***Polymer Handbook***, 4a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2004.

[5] Brydson, J. A., ***Plastics Materials***, 4a. ed., Butterworths & Co., Ltd., Londres, U.K., 1999.

[6] Chanda, M. y Roy, S. K., ***Plastics Technology Handbook***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1998.

[7] Charrier, J-M. ***Polymeric Materials and Processing***, Oxford University Press, Nueva York, 1991.

[8] ***Engineering Materials Handbook***, vol. **2**, Engi-neering Plastics, ASM International. Materials Park, Ohio, 2000.

[9] Flinn, R. A. y Trojan, P. K., **Engineering Materials and Applications**, 5a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[10] Hall, C., ***Polymer Materials***, 2a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1989.

[11] Hofmann, W., ***Rubber Technology Handbook***, Hanser Publishers, Munich, Alemania, 1988.

[12] Margolis, J. M., ***Engineering Thermoplastics–Pro-perties and Applications***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1985.

[13] McCrum, N. G., Buckley. C. P. y Bucknall, C. B. ***Principles of Polymer Engineering***, 2a. ed., Oxford University Press, Oxford, U.K., 1997.

[14] ***Modern Plastics Encyclopedia***, Modern Plastics, McGraw-Hill, Inc., Nueva Jersey, 1990.

[15] Reisinger, T. J. G., "Polymers of Tomorrow", ***Advanced Materials & Processes***, marzo de 2004, pp. 43-45.

[16] Rudin, A., ***The Elements of Polymer Science and Engineering***, 2a. ed., Academic Press. Inc., Orlando, Florida, 1998.

[17] Seymour, R. B. y Carraher, C. E., ***Seymour/Carraher's Polymer Chemistry***, 5a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 2000.

[18] Seymour. R. B., ***Engineering Polymer Sourcebook***, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1990.

PREGUNTAS DE REPASO

8.1. ¿Qué es un polímero?

8.2. ¿Cuáles son las tres categorías básicas de los polímeros?

8.3. ¿Cómo se comparan las propiedades de los polímeros respecto de las de los metales?

8.4. ¿Qué indica el grado de polimerización?

8.5. ¿Qué es el entrecruzamiento de un polímero y cuál es su significado?

8.6. ¿Qué es un copolímero?

8.7. Los copolímeros poseen cuatro arreglos diferentes de sus meros constitutivos. Mencione y describa brevemente algunos de los cuatro arreglos.

8.8. ¿Qué es un terpolímero?

8.9. ¿Cómo se ven afectadas las propiedades de un polímero cuando adopta una estructura cristalina?

8.10. ¿Un polímero alguna vez es 100% cristalino?
8.11. ¿Cuáles son algunos de los factores que influyen en la tendencia a cristalizar de un polímero?
8.12. ¿Por qué se agregan rellenos a un polímero?
8.13. ¿Qué es un plastificador?
8.14. Además de los rellenos y plastificadores, ¿qué otros aditivos se emplean con los polímeros?
8.15. Describa la diferencia en propiedades mecánicas como función de la temperatura entre termoplásticos muy cristalinos y los amorfos.
8.16. ¿Qué es lo distinto del polímero celulosa?
8.17. ¿De qué grupo de polímeros son miembros los nylons?
8.18. ¿Cuál es la fórmula química del etileno, el monómero del polietileno?
8.19. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre el polietileno de baja densidad y el de alta densidad?
8.20. ¿En qué difieren las propiedades de los polímeros termofijos de las de los termoplásticos?
8.21. El entrecruzamiento (curado) de los plásticos termofijos se lleva a cabo por una de tres maneras. Mencione estas tres.
8.22. Los polímeros elastómeros y termofijos son entrecruzados. ¿Por qué son tan diferentes sus propiedades?
8.23. ¿Qué le sucede a un elastómero cuando está por debajo de su temperatura de transición al vidrio?
8.24. ¿Cuál es el ingrediente polimérico principal del caucho natural?
8.25. ¿En qué difieren los elastómeros termoplásticos de los cauchos convencionales?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 20 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

8.1. De los tres tipos de polímeros, ¿cuál es el de mayor importancia comercial?: *a*) termoplásticos, *b*) termofijos o *c*) elastómeros.
8.2. ¿Cuál de los tres tipos de polímero no se considera normalmente como plástico?: *a*) termoplásticos, *b*) termofijos o *c*) elastómeros.
8.3. ¿Cuál de los tres tipos de polímero no involucra entrecruzamiento?: *a*) termoplásticos, *b*) termofijos o *c*) elastómeros.
8.4. Conforme el grado de cristalinidad de un polímero dado se incrementa, el polímero se vuelve más denso y rígido, y su temperatura de fusión disminuye: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.5. ¿Cuál de las siguientes es la fórmula química de la unidad repetitiva del polietileno?: *a*) CH_2, *b*) C_2H_4, *c*) C_3H_6, *d*) C_5H_8 o *e*) C_8H_8.
8.6. ¿Cuál de los siguientes es el grado de polimerización?: *a*) número promedio de meros en la cadena de moléculas; *b*) proporción del monómero que ha sido polimerizado; *c*) suma de los pesos moleculares de los meros en la molécula o *d*) ninguna de las anteriores.
8.7. Una estructura molecular ramificada es más fuerte en estado sólido y más viscosa si está fundida, que una estructura lineal del mismo polímero: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.8. Un copolímero es una mezcla de macromoléculas de dos homopolímeros diferentes: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.9. Conforme la temperatura de un polímero se incrementa, su densidad: *a*) aumenta, *b*) disminuye, *c*) permanece casi constante.
8.10. ¿Cuál de los plásticos siguientes tiene la mayor participación en el mercado?: *a*) fenoles, *b*) polietileno, *c*) polipropileno, *d*) poliestireno o *e*) cloruro de polivinilo.
8.11. ¿Cuáles de los polímeros siguientes normalmente son termoplásticos? (cuatro respuestas son las mejores): *a*) acrílicos, *b*) acetato de celulosa, *c*) nylon, *d*) fenoles, *e*) policloropreno, *f*) poliésteres, *g*) polietileno, *h*) poliisopreno e *i*) poliuretano.
8.12. El poliestireno (sin plastificadores) es amorfo, transparente y frágil: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.13. La fibra de rayón que se emplea en los textiles se basa en cuál de los polímeros siguientes: *a*) celulosa, *b*) nylon, *c*) poliéster, *d*) polietileno o *e*) polipropileno.
8.14. La diferencia básica entre el polietileno de baja densidad y el de alta es que este último tiene un grado mayor de cristalinidad: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.15. Entre los polímeros termofijos, ¿cuál de los siguientes es el que más se utiliza en forma comercial?: *a*) epóxicos, *b*) fenoles, *c*) silicones o *d*) uretanos.
8.16. ¿Cuál de las que siguen es la fórmula química del poliisopreno en el caucho natural?: *a*) CH_2, *b*) C_2H_4, *c*) C_3H_6, d) C_5H_8 o *e*) C_8H_8.
8.17. ¿Cuál de los siguientes es el caucho sintético líder en el comercio?: *a*) caucho butilo, *b*) caucho isopreno, *c*) polinutadieno, *d*) poliuretano, *e*) caucho estireno-butadieno o *f*) elastómeros termoplásticos.

9 MATERIALES COMPUESTOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Además de los metales, cerámicos y polímeros, es posible distinguir una cuarta categoría de materiales: los compuestos. Un ***material compuesto*** es un sistema de materiales compuesto por dos o más fases distintas físicamente cuya combinación produce propiedades agregadas diferentes de las de sus componentes. En ciertos aspectos, los compuestos son los materiales más interesantes de la ingeniería debido a que su estructura es más compleja que la de los demás tipos.

El interés tecnológico y comercial de los materiales compuestos proviene del hecho de que sus propiedades no sólo son distintas de las de sus componentes, sino que con frecuencia son mucho mejores. Algunas de las posibilidades incluyen las siguientes:

- Es posible diseñar compuestos que sean muy fuertes y rígidos, pero de peso muy ligero, lo que les da relaciones resistencia-peso y rigidez-peso varias veces mayores que las del acero o el aluminio. Estas propiedades son muy deseables para aplicaciones que van de la aviación comercial al equipo deportivo.
- Sus propiedades de fatiga por lo general son mejores que las de los metales comunes de ingeniería. Asimismo, es frecuente que la tenacidad sea mayor.
- Se puede diseñar compuestos que no se corroan como el acero; esto es importante en los automóviles y otras aplicaciones.

- ➢ Con los materiales compuestos es posible obtener combinaciones de propiedades que no son alcanzables con los metales, cerámicos o polímeros.
- ➢ Con ciertos materiales compuestos es posible obtener superficies de mejor apariencia y control de su suavidad.

Junto con las ventajas, hay desventajas y limitaciones asociadas con los materiales compuestos. Éstas incluyen las siguientes: 1) las propiedades de muchos compuestos importantes son anisotrópicas, lo que significa que difieren de acuerdo con la dirección en que se miden; 2) muchos de los compuestos basados en polímeros son susceptibles al ataque químico o de solventes, igual que los polímeros en sí; 3) por lo general, los materiales compuestos son caros, aunque sus precios disminuyen conforme aumenta el volumen y 4) algunos de los métodos de manufactura para dar forma a los materiales compuestos son lentos y costosos.

En el estudio de los otros tres tipos de materiales ya se han encontrado varios materiales compuestos. Algunos ejemplos incluyen los carburos cementados (carburo de tungsteno con aglutinante de cobalto), compuestos para moldear plásticos que contienen rellenos (por ejemplo, fibras de celulosa, aserrín) y caucho mezclado con negro de humo. Estos materiales no siempre se identifican como compuestos; sin embargo, técnicamente satisfacen la definición que se dio. Incluso podría argüirse que una aleación metálica de dos fases (por ejemplo, $Fe + Fe_3C$) es un material compuesto, aunque no se clasifique como tal. Quizás el material compuesto más importante de todos sea la madera.

En la presentación de los materiales compuestos, primero se examina su tecnología y clasificación. Hay muchos materiales y estructuras diferentes que se emplean para formar compuestos; se estudian las distintas categorías y se dedica más tiempo a los plásticos de fibra reforzada, que son el tipo de mayor importancia comercial. En la última sección se da una guía para los procesos de manufactura de los compuestos.

9.1 TECNOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Como se dijo en la definición, un material compuesto consiste en dos o más fases distintas. El término ***fase*** indica un material homogéneo, como metal o cerámico en los que todos los granos tienen la misma estructura cristalina, o un polímero sin rellenos. Al combinar las fases, con los métodos por describirse, se crea un material nuevo con rendimiento agregado que supera al de sus partes. El efecto es sinérgico.

Los materiales compuestos se pueden clasificar de varios modos. Una clasificación posible diferencia entre los compuestos 1) tradicionales y 2) los sintéticos. Los ***compuestos tradicionales*** son aquellos que ocurren en la naturaleza o que han sido producidos por las civilizaciones durante muchos años. La madera es un material compuesto que se da en la naturaleza, en tanto que el concreto (cemento Pórtland más arena o grava) y el asfalto mezclado con grava son compuestos tradicionales que se usan en la construcción. Los ***compuestos sintéticos*** son sistemas de materiales modernos que se asocian normalmente con las industrias manufactureras, en los que primero se producen los componentes por separado y después se combinan de manera controlada para alcanzar la estructura, propiedades y forma de las piezas que se desea. Estos materiales sintéticos son los compuestos en que es normal pensar en el contexto de los productos manufacturados. En este capítulo la atención se centró en esta clase de materiales.

9.1.1 Componentes de un material compuesto

En la manifestación más sencilla de la definición presentada, un material compuesto consiste en dos fases: una primaria y otra secundaria. La fase primaria forma la ***matriz*** en la que se encuentra incrustada la fase secundaria. En ocasiones a la fase incrustada

se le denomina como ***agente reforzador*** (o algún término similar), porque por lo general sirve para reforzar al compuesto. La fase reforzadora está en forma de fibras, partículas o algunas otras, como se verá. Generalmente, las fases son insolubles una en la otra, pero puede haber gran adhesividad en la interfaz.

La fase de la matriz es cualquiera de los tres tipos básicos de materiales: polímeros, metales o cerámicos. La fase secundaria también es uno de los tres materiales básicos, o un elemento como el carbono o el boro. Como se aprecia en la tabla 9.1, las combinaciones posibles en un material compuesto por dos constituyentes puede organizarse en arreglo de 3×4. Se observa que ciertas combinaciones no son factibles, como la de un polímero en una matriz cerámica. También se ve que las posibilidades incluyen dos estructuras de fase que consisten en componentes del mismo tipo de material, como fibras de Kevlar (polímero) en una matriz de plástico (polímero). En otros compuestos, el material incrustado es un elemento como el carbono o el boro.

El sistema de clasificación para los materiales compuestos que se usa en este libro se basa en la fase de la matriz. A continuación se enlistan las clases y se estudian en las secciones 9.2 a 9.4:

1. ***Compuestos de matriz metálica*** (MMC) incluyen mezclas cerámicas y metales, tales como los carburos cementados y otros cermets, así como aluminio o magnesio reforzado por fibras fuertes de alta rigidez.
2. ***Compuestos de matriz cerámica*** (CMC) son los de la categoría menos común. El óxido de aluminio y el carburo de silicio son los materiales que es posible incrustar con fibras para mejorar sus propiedades, en especial en aplicaciones de temperatura elevada.
3. ***Compuestos de matriz de polímero*** (PMC). Las resinas termofijas son los polímeros de mayor uso como PMC. Es común mezclar epóxicos y poliéster con fibras de refuerzo, y se mezcla fenol con polvos. Con frecuencia, los compuestos de termoplástico moldeado son reforzados con polvos (véase la sección 8.15).

La clasificación se aplica a compuestos tradicionales y a sintéticos. El concreto es un compuesto de matriz cerámica, en tanto que el asfalto y la madera son compuestos de matriz de polímero.

El material de la matriz desempeña varias funciones en el compuesto. En primer lugar, proporciona la forma general de la pieza o producto hecho del material compuesto. En segundo, mantiene la fase incrustada en su lugar, por lo general la encierra y con frecuencia la oculta. En tercer lugar, cuando se aplica una carga, la matriz comparte la carga con la fase secundaria, y en ciertos casos se deforma de modo que la fuerza la soporta en esencia el agente reforzador.

TABLA 9.1 Combinaciones posibles de materiales compuestos de dos constituyentes.

Fase secundaria (refuerzo)	Fase primaria (matriz)		
	Metal	Cerámico	Polímero
Metal	Piezas con polvo metálico infiltradas con un segundo metal	NA	Compuestos de plástico moldeado Llantas radiales con cinturones de acero
Cerámico	Cermets[a]	Al_2O_3 reforzado con filamentos de SiC	Compuestos de plástico moldeado Plástico reforzado con fibras de vidrio
Polímero	Piezas con polvo metálico impregnadas con polímero	NA	Compuestos de plástico moldeado Epóxico reforzado con Kevlar
Elementos (C, B)	Metales reforzados con fibras	NA	Caucho con negro de humo Plástico reforzado con fibra B o C

NA = no se aplica actualmente.

[a] Las cermets incluyen carburos cementados.



FIGURA 9.1 Formas físicas posibles de las fases incrustadas en los materiales compuestos: *a*) fibra, *b*) partícula y *c*) hojuela.

9.1.2 La fase de reforzamiento

Es importante entender que el papel jugado por la fase secundaria es reforzar a la primaria. Lo más común es que la fase incrustada tenga una de las formas que se ilustran en la figura 9.1: fibras, partículas u hojuelas. Además, la fase secundaria adopta la forma de una fase infiltrada en una matriz porosa o de esqueleto.

Fibras Las ***fibras*** son filamentos de material de refuerzo, por lo general de sección transversal circular, aunque en ocasiones se utilizan formas alternativas (por ejemplo, tubular, rectangular, hexagonal). Los diámetros varían de menos de 0.0025 mm (0.0001 in) a cerca de 0.13 mm (0.005 in), lo que depende del material.

El refuerzo con fibras proporciona la mayor oportunidad para mejorar la resistencia de las estructuras compuestas. En compuestos con fibra reforzadora es frecuente que ésta se considere el constituyente principal, puesto que soporta la parte mayor de la carga. Las fibras son de interés como agentes de refuerzo porque la mayor parte de materiales es significativamente más fuerte en forma de filamento que en otra voluminosa. En la figura 9.2 se observa el efecto del diámetro de la fibra sobre la resistencia a la tensión. Conforme el diámetro se reduce, el material se orienta en dirección del eje de la fibra y la probabilidad de que haya defectos en la estructura disminuye en forma significativa. Como resultado, la resistencia a la tensión aumenta mucho.

Las fibras que se emplean en los materiales compuestos son continuas o discontinuas. Las ***fibras continuas*** son muy largas; en teoría, ofrecen una trayectoria continua de modo que una carga se ve soportada por la parte compuesta. En realidad, esto es difícil de lograr debido a las variaciones en el material fibroso y a su procesamiento. Las ***fibras discontinuas*** (secciones cortadas de fibras continuas) son de longitud corta (L/D = 100, aproximadamente). Un tipo importante de fibra discontinua son los ***filamentos***, cristales individuales parecidos a cabello con diámetros inferiores a 0.001 mm (0.00004 in) y resistencia muy elevada.

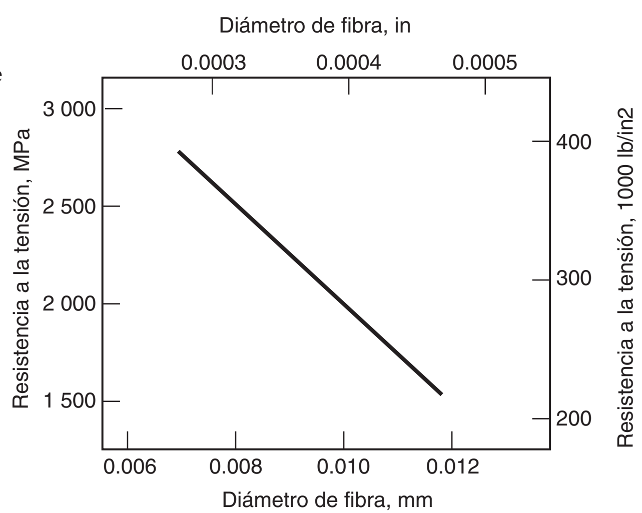
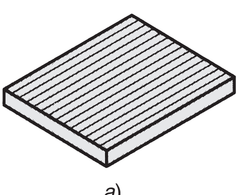
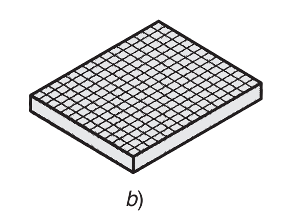


FIGURA 9.2 Relación entre la resistencia a la tensión y el diámetro para una fibra de carbono (fuente: [1]). Otros materiales filamentosos tienen relaciones similares.





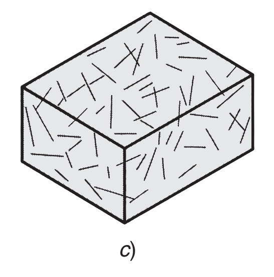


FIGURA 9.3 Orientación de las fibras en materiales compuestos: *a*) fibras continuas, unidimensionales; *b*) fibras continuas, planas, en forma de tejido; y *c*) fibras discontinuas al azar.

La orientación de las fibras es otro factor en las piezas compuestas. Se distinguen tres casos, que se ilustran en la figura 9.3: en el inciso *a*) se representa el refuerzo unidimensional, en el que la resistencia y rigidez máximas se obtienen en la dirección de la fibra; en el inciso *b*) se muestra el refuerzo plano, que en ciertos casos es en forma de tejido bidimensional, y en *c*) se muestra la orientación al azar o tridimensional, en la que el material compuesto tiende a poseer propiedades isotrópicas.

En los compuestos reforzados con fibras se usan materiales diferentes: metales, cerámicos, polímeros, carbono y boro. El uso de mayor importancia comercial de las fibras es en compuestos de polímero. Sin embargo, está creciendo el uso de metales y cerámicos reforzados con fibras. A continuación se presenta un análisis de los tipos importantes de materiales de fibra, cuyas propiedades se listan en la tabla 9.2.

➢ ***Vidrio*** La fibra de mayor uso en los polímeros, la ***fibra de vidrio***, se emplea para denotar el plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés). Las dos fibras de vidrio comunes son el vidrio E y el S (cuyas composiciones se listan en la tabla 7.5). El vidrio E es fuerte y de costo bajo, pero su módulo es menor que el de otras fibras. El vidrio S es más rígido y su resistencia a la tensión es una de las mayores de todos los materiales fibrosos; sin embargo, es más caro que el vidrio E.

➢ ***Carbono*** El carbono (véase la sección 7.5.1) está hecho de fibras con módulos elevados. Además de la rigidez, otras propiedades atractivas incluyen densidad baja y poca expansión térmica. Las fibras C por lo general son una combinación de grafito y carbono amorfo.

➢ ***Boro*** El boro (véase la sección 7.5.3) tiene un módulo de elasticidad alto, pero su costo elevado limita sus aplicaciones a componentes aeroespaciales en los que esa propiedad (y otras) es de importancia fundamental.

➢ ***Kevlar 49*** Ésta es la fibra de polímero más importante; es una aramida altamente cristalina, miembro de la familia de las poliamidas (véase la sección 8.2.2). Su gravedad específica es baja, lo que le da una de las relaciones de resistencia-peso más altas de todas las fibras.

➢ ***Cerámicos*** El carburo de silicio (SiC) y el óxido de aluminio (Al_2O_3) son los materiales de fibra principales entre los cerámicos. Ambos tienen módulos de elasticidad elevados y pueden usarse para dar resistencia a metales de baja densidad, como al alumnio y al magnesio.

TABLA 9.2 Propiedades comunes de materiales de fibra que se emplean como refuerzo en los compuestos.

	Diámetro		Resistencia a la tensión		Módulo de elasticidad	
Material de fibra	mm	mils[a]	MPa	lb/in^2	GPa	lb/in^2
Metal: acero	0.13	5.0	1 000	150 000	206	30×10^6
Metal: tungsteno	0.013	0.5	4 000	580 000	407	59×10^6
Cerámico: Al_2O_3	0.02	0.8	1 900	275 000	380	55×10^6
Cerámico: SiC	0.13	5.0	3 275	475 000	400	58×10^6
Cerámico: vidrio E	0.01	0.4	3 450	500 000	73	10×10^6
Cerámico: vidrio S	0.01	0.4	4 480	650 000	86	12×10^6
Polímero: Kevlar	0.013	0.5	3 450	500 000	130	19×10^6
Elemento: Carbono	0.01	0.4	2 750	400 000	240	35×10^6
Elemento: Boro	0.14	5.5	3 100	450 000	393	57×10^6

Recopilada a partir de las referencias [3], [7], [11] y otras fuentes. Observe que la resistencia depende del diámetro de la fibra (véase la figura 9.2); las propiedades de esta tabla deben interpretarse en consecuencia.

[a] 1 mil = 0.001 in.

➢ ***Metal*** –Filamentos de acero, tanto continuos como discontinuos, se emplean como fibras de refuerzo en los plásticos. En la actualidad otros metales son menos comunes como fibras de refuerzo.

Partículas y hojuelas La segunda forma común de la fase incrustada es la de ***partículas***, cuyo tamaño varía entre microscópico y macroscópico. Las partículas son un material importante para los metales y cerámicos; en los capítulos 16 y 17 se estudia el carácter y producción de los polvos de ingeniería.

La distribución de las partículas en la matriz del compuesto es al azar, y por ello la resistencia y otras propiedades del material por lo general son isotrópicas. El mecanismo para dar resistencia depende del tamaño de las partículas. El tamaño microscópico está representado por polvos muy finos (alrededor de 1 μm) distribuidos en la matriz en concentraciones de 15% o menos. La presencia de estos polvos da como resultado la dispersión de la dureza de la matriz, en la que el movimiento de dislocación en el material de la matriz está restringido por las partículas microscópicas. En efecto, es la matriz misma la que aumenta su resistencia y ninguna porción significativa de la carga que se aplica es soportada por las partículas.

Conforme el tamaño de las partículas aumenta al rango macroscópico, y la proporción del material incrustada se incrementa a 25% o más, el mecanismo de fortalecimiento cambia. En este caso, la carga aplicada la comparten la matriz y la fase incrustada. El aumento de la resistencia ocurre debido a la capacidad de carga de las partículas y a las uniones de las partículas en la matriz. Esta forma de fortalecimiento compuesto ocurre en los carburos cementados, en los que el carburo de tungsteno está inmerso en un aglutinante de cobalto. La proporción de WC en la matriz de Co por lo común es de 80% o más.

Las ***hojuelas*** son básicamente partículas bidimensionales, plaquetas planas y pequeñas. Dos ejemplos de esta forma son los minerales de mica (silicatos de K y A) y talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), que se usan como agentes reforzadores en los plásticos. Por lo general son materiales de costo menor que el de los polímeros, y dan resistencia y rigidez a los compuestos de plástico moldeado. Por lo general, los tamaños de las plaquetas están en el rango de 0.01 a 1 mm (0.0004 a 0.040 in) en su sección transversal, con espesor de 0.001 a 0.005 mm (0.04 a 0.20 mils).

Fase infiltrada La cuarta forma de fase incrustada ocurre cuando la matriz tiene la forma de esqueleto poroso (como esponja) y la segunda fase tan sólo es un ***relleno***. En este caso, la fase incrustada adopta la forma de los poros de la matriz. Los rellenos metálicos en ocasiones se emplean para infiltrar la estructura porosa abierta de piezas elaboradas por medio de técnicas de metalurgia de polvos (véase la sección 16.3.4), lo que crea, en efecto, un material compuesto. Otro ejemplo de esta categoría podría considerarse los componentes de PM sinterizados impregnados de aceite, tales como cojinetes y engranes.

La interfase Siempre hay una ***interfase*** entre las fases constituyentes en un material compuesto. Para que éste opere en forma eficaz, las fases deben enlazarse en el sitio de unión. En ciertos casos hay un enlace directo entre los dos ingredientes, como se sugiere en la figura 9.4*a*). En otros casos, se agrega un tercer componente para facilitar el enlace de las dos fases primarias. Este tercer ingrediente, llamado ***interfase***, se considera un adhesivo. Un ejemplo importante es el recubrimiento de fibras de vidrio para lograr adhesividad con resinas termofijas en los plásticos reforzados con fibra de vidrio. Como se ilustra en la figura 9.4b, este caso da lugar a dos interfases, una en cada frontera de la interfase. Por último, una tercera forma de interfase ocurre cuando los dos componentes primarios no son insolubles por completo uno en el otro; en este caso, la interfase que se forma consiste en una solución de las fases, como se aprecia en la figura 9.4c. Un ejemplo de esto sucede en los carburos cementados (véase la sección 9.2.1); a las temperaturas de sinterización altas que se usan en estos materiales, se origina cierta solubilidad en las fronteras que crea la interfase.

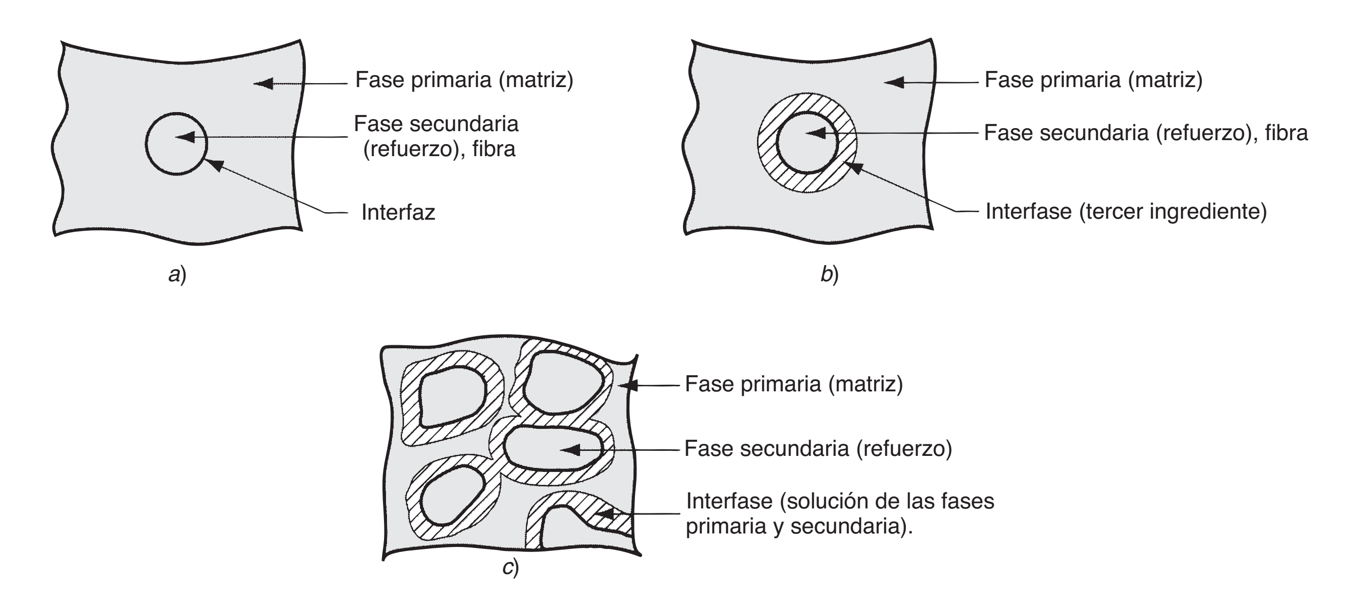


FIGURA 9.4 Uniones e interfases entre las fases de un material compuesto: *a*) enlace directo entre las fases primaria y secundaria; *b*) adición de un tercer ingrediente para unir las fases primaria y secundaria y formar una interfase; y *c*) formación de una interfase por solución de las fases primaria y secundaria en su frontera.

9.1.3 Propiedades de los materiales compuestos

En la selección de un material compuesto, en general se busca una combinación óptima de propiedades, en lugar de una propiedad en particular. Por ejemplo, el fuselaje y alas de una aeronave deben ser tanto ligeros como fuertes, rígidos y tenaces. Es difícil encontrar un material monolítico que satisfaga estos requerimientos. Son varios polímeros reforzados con fibra los que poseen esta combinación de propiedades.

Otro ejemplo es el caucho. El caucho natural es un material relativamente débil. A principios del siglo xx, se descubrió que si se agregan cantidades significativas de negro de humo (carbono casi puro) al caucho natural, su resistencia se eleva mucho. Los dos ingredientes interactúan para obtener un material compuesto que es significativamente mayor que cualquiera de los dos por sí solo. Por supuesto, el caucho también debe vulcanizarse para que adquiera toda su resistencia.

El caucho en sí es un aditivo útil para el poliestireno. Una de las propiedades distintivas y desventajosas del poliestireno es su fragilidad. Aunque la mayoría de otros polímeros tiene una ductilidad considerable, el PS no tiene virtualmente ninguna. Se agregan cantidades pequeñas (5 a 15%) de caucho (natural o sintético) para obtener poliestireno de alto impacto, que es más tenaz y resistente a los impactos.

Las propiedades de un material compuesto están determinadas por tres factores: 1) los materiales que se emplean como fases constituyentes en el compuesto, 2) formas geométricas de los constituyentes y estructura resultante del sistema compuesto y 3) la manera en que las fases interactúan una con otra.

Regla de las mezclas Las propiedades de un material compuesto son función de los materiales de inicio. Ciertas propiedades de un material compuesto se calculan por medio de la ***regla de las mezclas***, que involucra el cálculo de un promedio ponderado de las propiedades del material constitutivo. Un ejemplo de esta regla del promedio es la densidad. La masa de un material compuesto es la suma de las masas de las fases de la matriz y el refuerzo:

$$mc = m_m + m_r \tag{9.1}$$

donde m = masa, kg (lb); y los subíndices c, m y r indican las fases del compuesto, matriz y refuerzo, respectivamente. De manera similar, el volumen del compuesto es la suma de sus constituyentes:

$$V_c = V_m + V_r + V_v \quad (9.2)$$

donde V = volumen, cm^3 (in^3), V_v es el volumen de vacíos en el compuesto (por ejemplo, poros). La densidad del compuesto es la masa dividida entre el volumen.

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{m_m + m_r}{V_c} \quad (9.3)$$

Debido a que las masas de la matriz y la fase de refuerzo son sus densidades respectivas multiplicadas por sus volúmenes,

$$m_m = \rho_m V_m \text{ y } m_r = \rho_r V_r$$

se sustituyen estos términos en la ecuación (9.3) y se concluye que

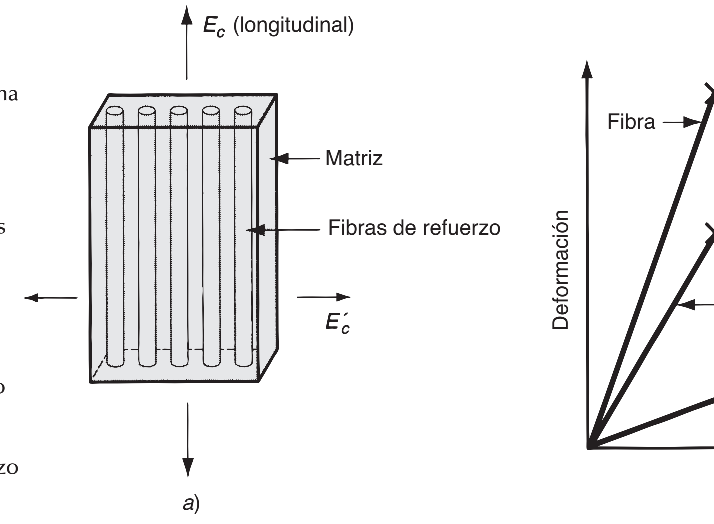
$$\rho_c = f_m \rho_m + f_r \rho_r \quad (9.4)$$

donde $f_m = V_m/V_c$ y $f_r = V_r/V_c$ son tan sólo las fracciones del volumen de las fases de la matriz y del refuerzo.

Compuestos de fibra reforzada Por lo general, la determinación de las propiedades mecánicas de los compuestos a partir de las propiedades de sus constituyentes es algo más complejo. La regla de las mezclas en ocasiones se emplea para estimar el módulo de elasticidad de un compuesto de fibra reforzada hecho de fibras continuas, donde E_c se mide en la dirección longitudinal. La situación se ilustra en la figura 9.5*a*); se supone que el material de la fibra es mucho más rígido que la matriz, y que el enlace entre las dos fases está garantizado. Con este modelo, el módulo del compuesto se predice como sigue:

$$E_c = f_m E_m + f_r E_r \quad (9.5)$$

donde E_c, E_m y E_r son los módulos de elasticidad del compuesto y sus constituyentes, MPa (lb/in^2); y f_m y f_r son, otra vez, las fracciones del volumen de las fases de la matriz y el refuerzo. El efecto de la ecuación (9.5) se aprecia en la figura 9.5*b*).



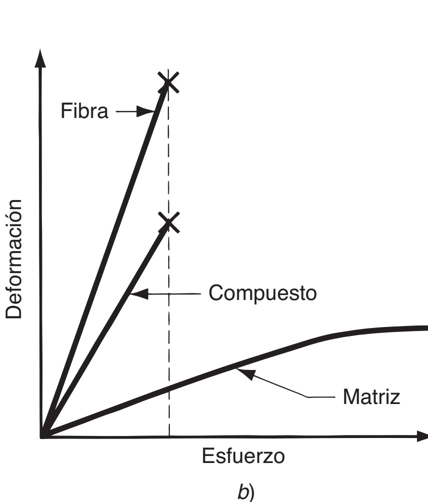
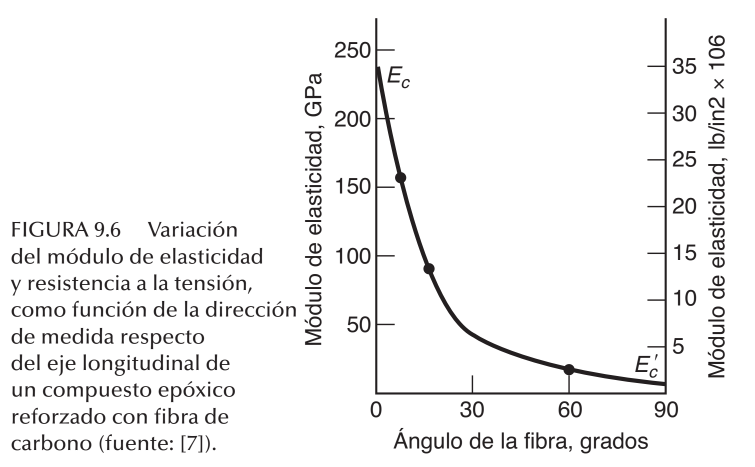


FIGURA 9.5 *a*) Modelo de un compuesto de fibra reforzada que muestra la dirección en la que se estima el módulo de elasticidad por medio de la regla de las mezclas. *b*) Relaciones esfuerzo-deformación para el material compuesto y sus constituyentes. La fibra es rígida pero frágil, en tanto que la matriz (un polímero, por lo común) es suave pero dúctil. El módulo del compuesto es un promedio ponderado de los módulos de sus componentes. Pero cuando las fibras de refuerzo fallan, también lo hace el compuesto.



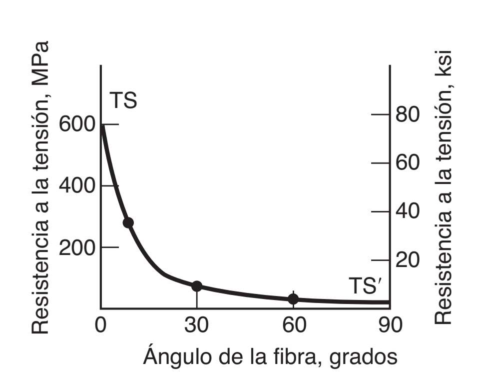


FIGURA 9.6 Variación del módulo de elasticidad y resistencia a la tensión, como función de la dirección de medida respecto del eje longitudinal de un compuesto epóxico reforzado con fibra de carbono (fuente: [7]).

En forma perpendicular a la dirección longitudinal, las fibras contribuyen poco a la rigidez conjunta, excepto por su efecto de relleno. El módulo compuesto se estima en esta dirección con la ecuación siguiente:

$$E_c = \frac{E_m E_r}{f_m E_r + f_r E_m} \tag{9.5}$$

donde E_c = módulo de elasticidad perpendicular a la dirección de la fibra, MPa (lb/in^2). Las dos ecuaciones para E_c demuestran la anisotropía significativa de los compuestos reforzados con fibra. Este efecto direccional se observa en la figura 9.6 para un compuesto de polímero reforzado con fibra, en la que tanto el módulo de elasticidad como la resistencia a la tensión se miden respecto de la dirección de la fibra.

Las fibras ilustran la importancia de la forma geométrica. La mayor parte de los materiales tienen resistencias a la tensión que son varias veces más grandes en forma de fibra que como cuerpo voluminoso. Sin embargo, las aplicaciones de las fibras están limitadas por defectos de la superficie, abombamiento cuando se les sujeta a compresión, y por las inconveniencias de la forma de un filamento cuando lo que se requiere es un componente sólido. Al incrustar las fibras en una matriz de polímero se obtiene un material compuesto que evita los problemas de las fibras pero aprovecha sus resistencias. La matriz proporciona la forma de volumen para proteger las superficies de las fibras y resistir el combamiento; las fibras tienden a transmitir su gran resistencia al compuesto. Cuando se aplica una carga, la matriz de resistencia baja se deforma y transmite la fuerza a las fibras de resistencia alta, que de ese modo soportan la carga. Si algunas fibras individuales se rompen, la carga se redistribuye hacia otras fibras a través de la matriz .

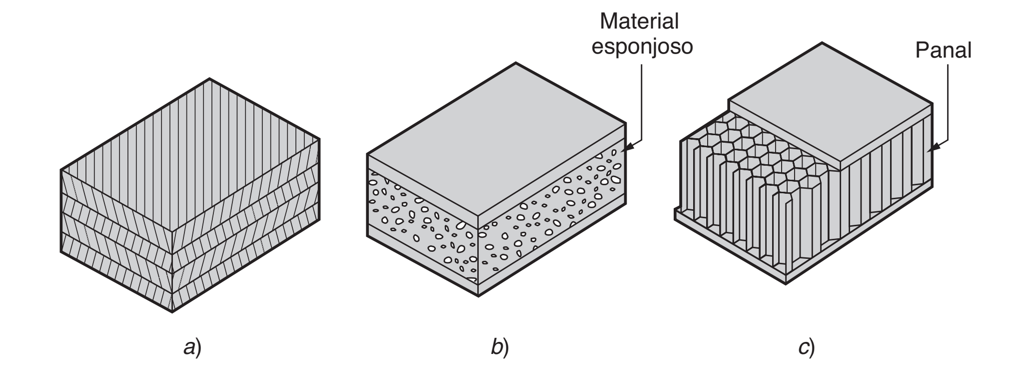


FIGURA 9.7 Estructuras de compuestos laminares: *a*) estructura laminar convencional, *b*) estructura de emparedado que usa un núcleo de esponja y *c*) estructura de emparedado de panal.

TABLA 9.3 Ejemplos de estructuras compuestas laminares.

Compuesto laminar	Descripción (consúltese el texto, si fuera aplicable)
Llantas de automóvil	Una llanta consiste en capas múltiples unidas; las capas son materiales compuestos (caucho reforzado con negro de humo), y los refuerzos consisten de tejidos impregnados de caucho (véase el capítulo 14).
Emparedado de panal	Una estructura ligera de panal está unida por ambas caras a láminas delgadas, como se aprecia en la figura 9.7*c*).
FRP	Los paneles de plástico de capas múltiples reforzados con fibra se emplean en los aviones, paneles de carrocerías automotrices y cascos de embarcaciones (véase el capítulo 15).
Triplay	Las hojas alternantes de madera están unidas con orientaciones y aislamientos diferentes para mejorar su resistencia.
Tarjetas de circuitos impresos	Se utilizan capas de cobre y plástico reforzado para la conducción y aislamiento eléctricos, respectivamente (véase la sección 36.2).
Esquís para nieve	Los esquís son estructuras compuestas laminares que consisten en capas múltiples de metales, tablero de partículas y plástico fenólico.
Parabrisas	Consiste en dos capas de vidrio a cada lado de una hoja de plástico rígido (véase la sección 12.3).

9.1.4 Otras estructuras compuestas

El modelo de material compuesto que se describió es uno en el que la fase de refuerzo está incrustada en una fase de matriz, y la combinación tiene propiedades superiores en ciertos aspectos a las de los constituyentes aislados. Sin embargo, los compuestos adoptan otras formas que no se ajustan a este modelo, algunas de las cuales tienen importancia comercial y tecnológica considerable.

Una ***estructura compuesta laminar*** consiste en dos o más capas unidas que forman una pieza integral, como se aprecia en la figura 9.7*a*). Por lo general, las capas son suficientemente gruesas como para que el compuesto se identifique con facilidad, que no siempre es el caso de otros compuestos. Es frecuente que las capas sean de materiales diferentes, pero esto no es imprescindible. El triplay es un ejemplo de ello; las capas son de la misma madera, pero los granos están orientados en forma diferente para incrementar la resistencia conjunta de la pieza laminada. Con frecuencia, un compuesto laminar emplea materiales diferentes en sus capas para adquirir la ventaja de combinar las propiedades particulares de cada uno. En ciertos casos, las capas en sí son de materiales compuestos. Ya se mencionó que la madera es un material compuesto; por tanto, el triplay es una estructura compuesta laminar en la que las capas en sí son materiales compuestos. En la tabla 9.3 se presenta una lista de ejemplos de compuestos laminares.

La ***estructura de emparedado*** a veces se clasifica como caso especial de la estructura compuesta laminar. Consiste en un núcleo relativamente grueso de material de baja densidad unido por ambas caras a hojas delgadas de materiales diferentes. El núcleo de baja densidad es un ***material esponjoso***, como se aprecia en la figura 9.7*b*), o un ***panal***, como en c). La razón de utilizar una estructura en emparedado es obtener un material con relaciones altas de resistencia a peso y de rigidez a peso.

9.2 COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA

Los compuestos de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés) consisten en una matriz de metal reforzada por una segunda fase. Es común que las fases reforzadoras incluyan 1) partículas de cerámica y 2) fibras de materiales diversos, que incluyen otros metales, cerámicos, carbono y boro. Es común denominar a los MMC del primer tipo como cermets.

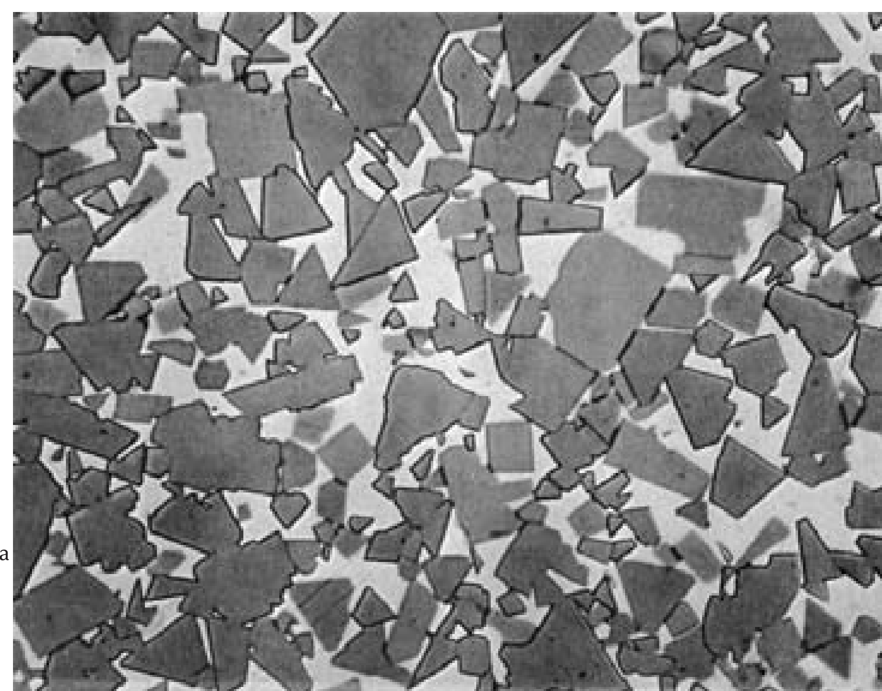


FIGURA 9.8 Microfotografía (alrededor de 1 500X) de carburo cementado con 85% de WC y 15% de Co. (Fotografía por cortesía de Kennametal Inc.).

9.2.1 Cermets

Un ***cermet***[1] es un material compuesto en el que un cerámico está contenido en una matriz metálica. Es frecuente que el cerámico domine la mezcla, pues a veces su volumen llega a ser de hasta 96%. El enlace puede mejorarse por medio de una solubilidad ligera entre las fases a temperaturas elevadas que se utilizan para procesar estos compuestos. Los cermets se dividen en 1) carburos cementados y 2) cermets con base en óxidos.

Carburos cementados Los ***carburos cementados*** están integrados de uno o más compuestos de carburo enlazados en una matriz metálica. El término ***cermet*** no se emplea para todos estos materiales, aun cuando es técnicamente correcto. Los carburos cementados comunes se basan en los carburos de tungsteno (WC), de titano (TiC) y de cromo (Cr_3C_2). También se emplea el carburo de tantalio (TaC) y otros, pero son menos comunes. Los aglutinantes metálicos principales son el cobalto y el níquel. Ya se estudiaron los cerámicos de carburo (véase la sección 7.3.2); constituyen el ingrediente principal de los carburos cementados, y es común que su contenido varíe de 80% a 95% del peso total.

Las piezas de carburo cementado se producen con técnicas de procesamiento de partículas (véase la sección 17.3). El cobalto es el aglutinante que se utiliza para el WC (véase la figura 9.8), y el níquel es el más común para el TiC y el Cr_3C_2. Aun cuando el aglutinante constituye sólo 5% a 15%, su efecto sobre las propiedades mecánicas es significativo en el material compuesto. Si se utiliza el WC-Co como ejemplo, se ve que conforme se incrementa el porcentaje de Co la dureza disminuye y la resistencia transversal a la ruptura (TRS) aumenta, como se aprecia en la figura 9.9. La TRS se correlaciona con la rigidez del compuesto de WC-Co.

Las herramientas de corte son la aplicación más común de los carburos cementados, con base en el ***carburo de tungsteno***. Otras aplicaciones de los carburos cementados de WC-Co incluyen los dados para estirar alambre, brocas para taladros de roca y otras herramientas de minería, troqueles para metalurgia de polvos, indentadores para probadores de dureza,

[1] La palabra *cermet* se usó por vez primera en la lengua inglesa alrededor de 1948.

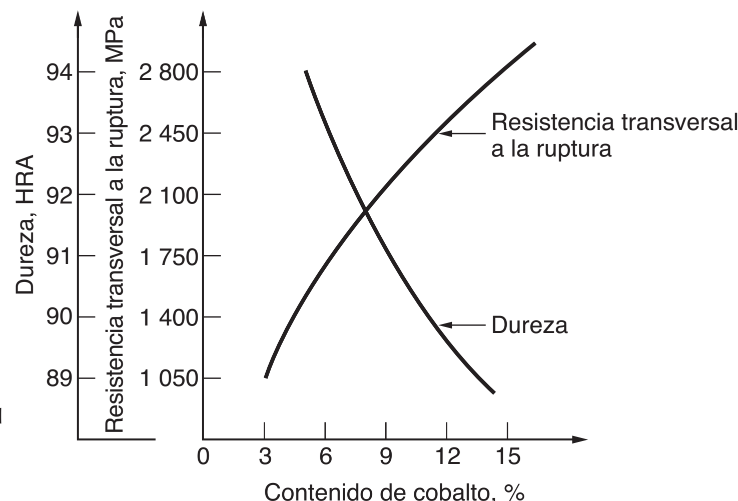


FIGURA 9.9 Gráfica normal de la resistencia transversal a la ruptura como función del contenido de cobalto.

y otras aplicaciones en las que la dureza y resistencia al desgaste son requerimientos de importancia crítica.

Los cermets de ***carburo de titanio*** se emplean principalmente en aplicaciones de alta temperatura. El níquel es el aglutinante preferido; su resistencia a la oxidación en condiciones de temperaturas elevadas es superior a la del cobalto. Las aplicaciones incluyen aspas de toberas de turbinas de gas, asientos de las válvulas, tubos de protección de termopares, boquillas de sopletes y herramientas giratorias de trabajo en caliente [11]. El TiC-Ni también se emplea como material de las herramientas de corte en las operaciones de maquinado.

En comparación con los carburos cementados de WC-Co, los ***carburos de cromo*** unidos por níquel son más frágiles, pero tienen estabilidad química y resistencia a la corrosión excelentes. Esta combinación, junto con su buena resistencia al desgaste, los hace apropiados para aplicaciones tales como bloques de calibrador, forros de válvulas, boquillas rociadoras y anillos para sellar cojinetes [11].

Cermets con base en óxidos La mayoría de estos compuestos emplean Al_2O_3 como la fase de partículas; el MgO es otro óxido que se utiliza en ocasiones. Una matriz metálica común es el cromo, aunque también se usan otros metales como aglutinantes. Las proporciones relativas de las dos fases varían de manera significativa, y cabe la posibilidad de que el aglutinante metálico sea el ingrediente principal. Las aplicaciones incluyen herramientas de corte, sellos mecánicos y escudos de termopares.

9.2.2 Compuestos de matriz metálica de fibra reforzada

Estos MMC son de interés debido a que combinan la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad elevados de una fibra con metales de densidad baja, lo que arroja buenas relaciones de resistencia peso y módulo a peso para el material compuesto que resulta. Los metales comunes que se emplean como matriz de densidad baja son el aluminio, magnesio y titanio. Algunos de los materiales de fibra importantes que se emplean en los compuestos son el Al_2O_3, boro, carbono y SiC.

Como era de esperarse, las propiedades de los MMC de fibra reforzada son anisotrópicos. La resistencia máxima a la tensión en la dirección preferente se obtiene con el empleo de fibras continuas enlazadas con fuerza a la matriz metálica. El módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión del material compuesto se incrementan con el aumento del volumen de las fibras. Los MMC con refuerzo de fibra tienen propiedades buenas de resistencia a temperaturas elevadas; y son buenos conductores eléctricos y térmicos. Las aplicaciones han sido sobre todo componentes de maquinaria y turbinas de aviones, en las que se aprovechan esas propiedades.



FIGURA 9.10 Fotografía muy amplificada de microscopio electrónico (alrededor de 3 000X) que muestra la superficie fracturada de un filamento cerámico (Al_2O_3) reforzada de SiC, que se usa como material para herramientas de corte. (Cortesía de Greenleaf Corporation.)

9.3 COMPUESTOS DE MATRIZ CERÁMICA

Los cerámicos tienen ciertas propiedades atractivas: rigidez, dureza, dureza en caliente y resistencia a la compresión elevadas, así como densidad relativamente baja. Los cerámicos también tienen varias desventajas: pocas tenacidad y resistencia a la tensión volumétrica, y son susceptibles de sufrir agrietamiento térmico. Los compuestos de matriz cerámica (CMC) representan un intento de conservar las propiedades deseables de los cerámicos al tiempo que compensan su debilidad. Los CMC consisten en una fase primaria de cerámica incrustada en una secundaria. A la fecha, el trabajo más fructífero se ha centrado en el uso de fibras como fase secundaria. El éxito ha sido elusivo. Las dificultades técnicas incluyen compatibilidad térmica y química de los constituyentes de los CMC durante el procesamiento. Asimismo, igual que con cualquier material cerámico, deben tomarse en cuenta las limitaciones de la forma de la pieza.

Los materiales cerámicos empleados como matrices incluyen la alúmina (Al_2O_3), carburo de boro (B_4C), nitruro de boro (BN), carburo de silicio (SiC), nitruro de silicio (Si_3N_4), carburo de titanio (TiC) y varios tipos de vidrio [10]. Algunos de estos materiales aún están en la etapa de desarrollo como matrices para CMC. Los materiales fibrosos en los CMC incluyen carbono, SiC y Al_2O_3.

La fase reforzadora en la tecnología actual de CMC consiste en cualquiera de las siguientes: fibras cortas, tales como filamentos, o fibras largas. Los productos con fibras cortas se han fabricado con éxito por medio de métodos de procesamiento de partículas (véase el capítulo 7), en los que las fibras se tratan como una forma de polvo en estos materiales. Aunque hay ventajas en cuanto al rendimiento en el empleo de fibras largas como refuerzo de ciertos compuestos de matriz cerámica, el desarrollo de técnicas económicas de procesamiento de esos materiales ha sido difícil. Una aplicación comercial prometedora de los CMC es en herramientas de corte de metal como competencia de los carburos cementados, como se ilustra en la figura 9.10. El material compuesto para herramientas tienen filamentos de SiC en una matriz de Al_2O_3. Otras aplicaciones potenciales existen en temperaturas elevadas y ambiente que son de química corrosiva para otros materiales.

9.4 COMPUESTOS DE MATRIZ DE POLÍMERO

Un ***compuesto de matriz de polímero*** (PMC, por sus siglas en inglés) consiste en una fase primaria de polímero en la que está incrustada una fase secundaria en forma de fibras, partículas u hojuelas. En el comercio, los PMC son los más importantes de las tres clases de compuestos sintéticos. Incluyen la mayoría de compuestos de plástico moldeado, caucho

reforzado con negro de humo y polímeros reforzados con fibras (FRP). De los tres, los FRP son los que se identifican más de cerca con el término compuesto. Si a un ingeniero de diseño se le dice “material compuesto”, por lo general piensa en un FRP.

9.4.1 Polímeros de fibra reforzada

Un ***polímero de fibra reforzada*** es un material compuesto que consiste en una matriz de polímero incrustada con fibras de alta resistencia. Por lo general, la matriz de polímero es un plástico termofijo, como el poliéster insaturado o epóxico, pero también se emplean los polímeros termoplásticos, tales como los naylons (poliamidas), policarbonato, poliestireno y cloruro de polivinilo. Además, los elastómeros también se refuerzan con fibras para productos de caucho tales como llantas y bandas transportadoras.

Las fibras de los CMP adoptan formas diversas: discontinua (en trozos), continua o tejido como tela. Los materiales principales de la fibra en los FRP son el vidrio, el carbono y el Kevlar 49. Las fibras menos comunes incluyen el boro, SiC y Al_2O_3, y el acero. El vidrio (en particular el vidrio E) es el material de fibra más común en los FRP de hoy; su uso como reforzador de plásticos data de 1920, aproximadamente.

El término ***compuestos avanzados*** se emplea en ocasiones en relación con los FRP desarrollados a partir del final de la década de 1960 y que emplean boro, carbono o Kevlar como fibras reforzadoras [12]. La matriz de polímero más común es epóxica. Estos compuestos por lo general tienen alto contenido de fibras (más de 50% del volumen) y poseen elevadas resistencia y módulo de elasticidad. Cuando se combinan dos o más materiales de fibra en el compuesto FRP, se denomina ***compuesto híbrido***. Las ventajas de los híbridos sobre los FRP convencionales o avanzados incluyen el balance entre la resistencia y la rigidez, tenacidad y resistencia al impacto mejoradas, y peso reducido [11]. Los compuestos avanzados e híbridos se utilizan en aplicaciones aeroespaciales.

La forma más usada de los FRP es una estructura laminar, hecha por el apilamiento y unión de capas delgadas de fibra y polímero hasta que se obtiene el espesor deseado. Al variar la orientación de las fibras entre las capas, se logra el nivel de anisotropía especificado en las propiedades del laminado. Este método se emplea para formar piezas de sección transversal delgada tales como alas y secciones del fuselaje de los aviones, paneles de carrocería de autos y camiones, así como cascos de embarcaciones.

Propiedades Hay cierto número de características atractivas que distinguen a los plásticos reforzados con fibra entre los materiales de la ingeniería. Las más notables son: 1) relación elevada resistencia a peso, 2) razón grande módulo a peso y 3) gravedad específica baja. Un FRP común pesa sólo la quinta parte que el acero, pero su resistencia y módulo son similares en la dirección de la fibra. En la tabla 9.4 se comparan las propiedades para varios FRP, aceros y aleaciones de aluminio. Las propiedades que se listan en ella dependen de la proporción de fibras en el compuesto. Tanto la resistencia a la tensión como el módulo elástico se incrementan conforme aumenta el contenido de fibra, según la ecuación (9.5). Otras propiedades y características de los plásticos de fibra reforzada incluyen 4) buena resistencia a la fatiga; 5) buena resistencia a la corrosión, aunque los polímeros son solubles en diferentes productos químicos; 6) expansión térmica baja de muchos FRP, lo que lleva a una estabilidad dimensional apropiada y 7) anisotropía significativa de sus propiedades. En relación con este último rasgo, las propiedades mecánicas de los FRP que se dan en la tabla 9.4 son en la dirección de la fibra. Como ya se dijo, cuando se miden en una dirección diferente, sus valores son significativamente menores.

Aplicaciones Durante las últimas tres décadas ha habido un crecimiento sostenido en la aplicación de polímeros reforzados con fibra en productos que requieren mucha resistencia y poco peso, con frecuencia como sustitutos de metales. La industria aeroespacial es uno

TABLA 9.4 Comparación de las propiedades comunes de los plásticos de fibra reforzada y aleaciones metálicas representativas.

Material	Gravedad específica (*SG*)	Resistencia a la tensión (*TS*)		Módulo de elasticidad (*E*)		Índice[a]	
		MPa	lb/in^2	GPa	lb/in^2	*TS*/*SG*	*E*/*SG*
Acero al bajo C	7.87	345	50 000	207	30×10^6	1.0	1.0
Aleación de acero (tratada térmicamente)	7.87	3 450	500 000	207	30×10^6	10.0	1.0
Aleación de aluminio (tratada térmicamente)	2.70	415	60 000	69	10×10^6	3.5	1.0
FRP: fibra de vidrio en poliéster	1.50	205	30 000	69	10×10^6	3.1	1.7
FRP: carbono en epóxico[b]	1.55	1 500	220 000	140	20×10^6	22.3	3.4
FRP: carbono en epóxico[c]	1.65	1 200	175 000	214	31×10^6	16.7	4.9
FRP: Kevlar en matriz epóxica	1.40	1 380	200 000	76	11×10^6	22.5	2.1

Recopilado a partir de las referencias [3] y [7], y otras fuentes. Las propiedades están medidas en la dirección de la fibra.

[a] Los índices son relaciones de resistencia a la tensión-peso (TS/SG) y módulo de elasticidad-peso (E/SG), comparadas con el acero al bajo C (índice = 1.0 para la base).

[b] En los FRP se emplean fibras de carbono de alta resistencia a la tensión.

[c] En los FRP se utilizan fibras de carbono de módulo alto.

de los usuarios más grandes de los materiales compuestos. Los diseñadores luchan de manera continua para reducir el peso de las aeronaves a fin de incrementar la eficiencia del combustible y la capacidad de carga. Las aplicaciones de materiales compuestos en la aviación tanto militar como comercial han crecido en forma sostenida. Gran parte del peso estructural de los aviones y helicópteros de hoy día consiste en FRP. En la figura 9.11 se identifican los compuestos empleados en el Boeing 757.

La industria automotriz es otro usuario importante de FRP. Las aplicaciones más obvias de los FRP son en paneles de la carrocería de autos y camiones. Un ejemplo notable es el Chevrolet Corvette, que durante décadas ha sido producido con carrocería de FRP. En ciertos chasises y partes de motores hay aplicaciones menos evidentes. Las

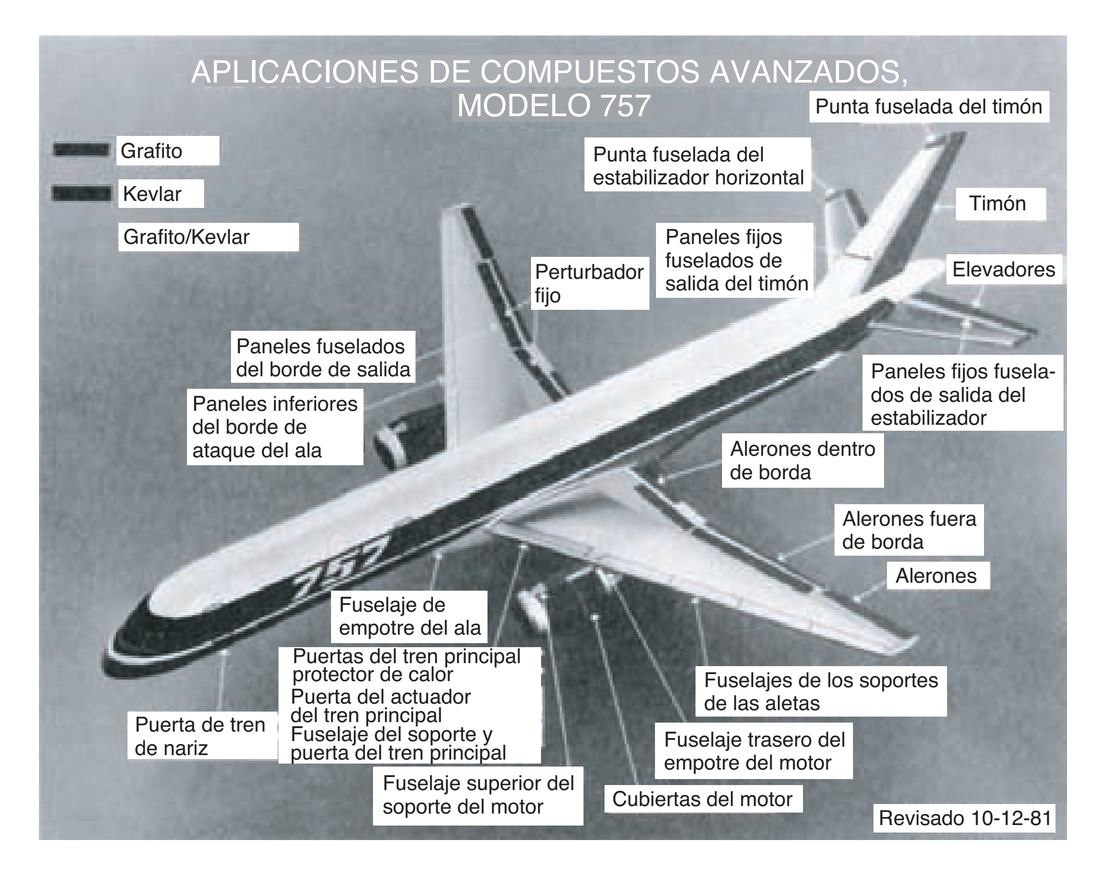


FIGURA 9.11 Materiales compuestos en el Boeing 757. (Cortesía de Commercial. Airplane Group.)

aplicaciones automotrices difieren de las de la industria aeroespacial en dos aspectos significativos. En primer lugar, el requerimiento de una relación elevada resistencia a peso es menos demandante que en los aviones. Las aplicaciones de carros y camiones usan plásticos reforzados con fibra de vidrio convencionales en lugar de compuestos avanzados. En segundo lugar, las cantidades de producción son mucho mayores en las aplicaciones automotrices, lo que requiere de métodos más económicos de fabricación. El uso continuo de láminas de acero al bajo carbono para los automóviles a pesar de las ventajas de los FRP es una evidencia del costo bajo y facilidad de procesamiento del acero.

Los FRP se han adoptado ampliamente para el equipo recreativo y deportivo. El plástico reforzado con fibra de vidrio se ha empleado para cascos de embarcaciones desde la década de 1940. Las cañas de pescar fueron otra aplicación temprana. Hoy día, los FRP se hallan representados en un conjunto amplio de productos deportivos, incluidas raquetas para tenis, palos de golf, cascos de futbol, arcos y flechas, esquís y ruedas de bicicleta.

9.4.2 Otros compuestos de matriz de polímero

Además de los FRP, otros PMC contienen partículas, hojuelas y fibras cortas. Los ingredientes de la fase secundaria reciben el nombre de ***rellenos*** cuando se usan en compuestos de polímeros moldeados (véase la sección 8.1.5). Los rellenos se dividen en dos categorías: 1) refuerzos y 2) extensores. Los ***rellenos de refuerzo*** sirven para dar resistencia o mejorar de otro modo las propiedades mecánicas del polímero. Los ejemplos comunes incluyen: aserrín y polvo de mica en resinas fenólicas y de aminas para incrementar la resistencia, resistencia a la abrasión y estabilidad dimensional, así como negro de humo en el caucho para mejorar su resistencia, resistencia al corte y al desgaste. Los ***extensores*** sencillamente incrementan el volumen y reducen el costo por unidad de peso del polímero, pero tienen poco efecto o ninguno sobre sus propiedades mecánicas. Los extensores se formulan para mejorar las características del moldeo de la resina.

Los polímeros esponjosos (véase la sección 13.11) son una forma de compuestos en los que burbujas de gas están incrustadas en una matriz de polímero. La estiroesponja y la esponja de poliuretano son los ejemplos más comunes. La combinación de la densidad casi igual a cero del gas y la densidad relativamente baja de la matriz hacen que estos materiales sean de peso ligero en extremo. La mezcla de gas también conlleva conductividad térmica muy baja para aplicaciones en las que se requiere aislamiento del calor.

9.5 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos reciben su forma por medio de muchas tecnologías diferentes de procesamiento. Las dos fases por lo común se producen por separado antes de combinarse en la forma de la pieza compuesta. Las fases de la matriz por lo general se procesan con tecnologías que se describieron en los capítulos 6, 7 y 8 para los metales, cerámicos y polímeros.

Los métodos de procesamiento para la fase incrustada dependen de la forma. La producción de fibra se describe en la sección 12.2.3 para el vidrio, y en la 13.4 para los polímeros. Los métodos de producción de fibra para el carbono, boro y otros materiales se resumen en la tabla 15.1. La producción de polvo para los metales se estudia en la sección 16.2, y para los cerámicos en la 17.1.1. Las técnicas de procesamiento para fabricar MMC y CMC son similares a las que se emplean para metales en polvo y cerámicos (véanse los capítulos 16 y 17). En la sección 17.3 se trata el procesamiento específico de los cermets.

Es común que los procesos de moldeo se lleven a cabo en los PMC, de los tipos de fibra tanto en partículas como en trozos. Los procesos de moldeo para estos compuestos son los mismos que aquellos empleados para los polímeros (véase el capítulo 13). Otros procesos más especializados para los compuestos de matriz de polímero, en particular

los polímeros reforzados con fibra, se describen en el capítulo 15. Muchas estructuras compuestas laminadas y de panal se ensamblan por medio de uniones adhesivas (véase la sección 32.3)

REFERENCIAS

[1] Chawla, K. K. ***Composite Materials Science and Engineering,*** 2a. ed., Springer-Verlag, Nueva York, 2001.

[2] Delmonte, J., ***Metal-Polymer Composites,*** Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1990.

[3] ***Engineering Materials Handbook,*** vol. **1**, Composites, ASM International, Metals Park, Ohio, 1987.

[4] Flinn, R. A. y Trojan, P. K., ***Engineering Materials and Their Applications,*** 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[5] Greenleaf Corporation, ***WG-300–Whisker Reinforced Ceramic/Ceramic Composites*** (Marketing literature), Saegertown, Pennsylvania.

[6] Hunt, W. H., Jr. y Herling, S. R., "Aluminum Metal-Matrix Composites", ***Advanced Materials & Processes,*** febrero de 2004, pp. 39-42.

[7] Mallick, P. K., ***Fiber-Reinforced Composite: Materials, Manufacturing, and Designs,*** 2a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1993.

[8] McGrum, N. G., Buckley, C. P. y Bucknall, C. B., ***Principles of Polymer Engineering,*** 2a. ed., Oxford University Press, Inc., Oxford, UK, 1997.

[9] Morton-Jones, D. H., ***Polymer Processing,*** Chapman and Hall, Londres, UK, 1989.

[10] Naslain, R. y Harris, B. (eds.) ***Ceramic Matrix Composites,*** Elsevier Applied Science. Londres y Nueva York, 1990.

[11] Schwartz, M. M., ***Composite Materials Handbook,*** 2a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1992.

[12] Wick, C. y Veilleux R. F. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed. Volumen III-Materials, Finishing, and Coating, 1985, capítulo 8.

[13] Zweben, C., Hahn, H. T. y Chou, T-W, ***Delaware Composites Design Encyclopedia,*** vol. **1**, ***Mechanical Behavior and Properties of Composite Materials,*** Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, Pennsylvania, 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

9.1. ¿Qué es un material compuesto?

9.2. Identifique algunas de las propiedades características de los materiales compuestos.

9.3. ¿Qué significa el término anisotrópico?

9.4. ¿Cómo se distinguen los compuestos tradicionales de los sintéticos?

9.5. Mencione las tres categorías básicas de materiales compuestos.

9.6. ¿Cuáles son las formas comunes de la fase de refuerzo en los materiales compuestos?

9.7. ¿Qué es un filamento?

9.8. ¿Cuáles son las dos formas de la estructura de emparedado entre las estructuras de compuestos laminares? Describa con brevedad cada una.

9.9. Dé algunos ejemplos de productos comerciales que sean estructuras compuestas laminares.

9.10. ¿Cuáles son los tres factores generales que determinan las propiedades de un material compuesto?

9.11. ¿Cuál es la regla de las mezclas?

9.12. ¿Qué es un cermet?

9.13. ¿Qué clase de compuestos son los carburos cementados?

9.14. ¿Cuáles son algunas de las debilidades de los cerámicos que pueden corregirse en los compuestos de matriz cerámica reforzados con fibra?

9.15. ¿Cuál es el material más común para las fibras que se usan en los plásticos reforzados con ellas?

9.16. ¿Qué significa el término compuestos avanzados?

9.17. ¿Qué es un compuesto híbrido?

9.18. Identifique algunas de las propiedades importantes de los materiales compuestos de plástico reforzado con fibra.

9.19. Mencione algunas de las aplicaciones importantes de los FRP.

9.20. ¿Qué significa el término interfaz, en el contexto de los materiales compuestos?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

9.1. ¿Cuál de los siguientes es el significado de anisotrópico?: *a*) materiales compuestos con composición que consiste en más de dos materiales, *b*) las propiedades son las mismas en cualquier dirección, *c*) las propiedades varían en función de la dirección en que se miden o *d*) la resistencia y otras propiedades son función de la temperatura de curado.

9.2. La fase de refuerzo es la matriz dentro de la cual está incrustada la fase secundaria: *a*) verdadero o *b*) falso.

9.3. ¿Cuál de las siguientes formas de refuerzo ofrece el potencial más grande para mejorar la resistencia y rigidez en el material compuesto resultante?: *a*) fibras, *b*) hojuelas, *c*) partículas o *d*) fase infiltrada.

9.4. ¿Cuál de los tipos siguientes compuestos es de madera?: *a*) CMC, *b*) MMC o *c*) PMC.

9.5. ¿Cuáles de los materiales siguientes se emplean como fibras en los plásticos reforzados con fibras? (cuatro respuestas mejores): *a*) óxido de aluminio, *b*) boro, *c*) hierro colado, *d*) vidrio E, *e*) epóxicos, *f*) Kevlar 49, *g*) poliéster y *h*) silicio.

9.6. ¿Cuáles de los metales siguientes se usan como material de la matriz de los MMC reforzados con fibra? (dos respuestas mejores): *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) hierro, *d*) magnesio y *e*) zinc.

9.7. ¿Cuáles de los metales siguientes se emplean como matrices en casi todos los carburos cementados de WC y en los cermets de TiC? (dos respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) cromo, *c*) cobalto, *d*) plomo, *e*) níquel, *f*) tungsteno o *g*) carburo de tungsteno.

9.8. ¿Los compuestos de matriz cerámica están diseñados para corregir cuál de las debilidades siguientes de los cerámicos? (dos respuestas mejores): *a*) resistencia a la compresión, *b*) dureza, *c*) dureza en caliente, *d*) módulo de elasticidad, *e*) resistencia a la tensión o *f*) tenacidad.

9.9. ¿Cuáles de los tipos siguientes de polímero se usan más comúnmente en los compuestos de matriz de polímero?: *a*) elastómeros, *b*) termoplásticos o *c*) termofijos.

9.10. Identifique cuáles de los materiales siguientes no son compuestos (dos respuestas correctas): *a*) carburo cementado, *b*) compuesto fenólico moldeado, *c*) triplay, *d*) cemento Portland, *e*) caucho de las llantas de coches, *f*) madera o *g*) acero 1020.

PROBLEMAS

9.1. Un compuesto de fibra de vidrio está hecho de una matriz de éster vinílico y fibras reforzadoras de vidrio E. La fracción de volumen del vidrio E es de 35%. El resto corresponde al éster vinílico. La densidad del éster vinílico es de 0.882 g/cm^3, y su módulo de elasticidad es de 3.60 GPa. La densidad del vidrio E es de 2.60 g/cm^3 y su módulo de elasticidad es de 76.0 GPa. Una sección del compuesto de 1.00 cm × 50.00 cm × 200.00 está fabricada con las fibras de vidrio E colocadas en dirección longitudinal a lo largo de 200 cm. Suponga que en el compuesto no hay vacíos. Determine *a*) la masa del éster vinílico en la sección, *b*) la masa de las fibras del vidrio E en la sección y *c*) la densidad del compuesto.

9.2. Para el problema 9.1, determine el módulo de elasticidad en *a*) la dirección longitudinal de las fibras de vidrio y *b*) la dirección perpendicular a las fibras de vidrio.

9.3. Una muestra compuesta de epóxico reforzado con carbono tiene las dimensiones de 12 in × 12 in × 0.25 in, y una masa de 1.8 lb. Las fibras de carbono tienen un módulo de elasticidad de 50(10^6) lb/in^2, y una densidad de 0.069 lb/in^3. La matriz epóxica tiene un módulo de elasticidad de 0.61(10^6) lb/in^2 y una densidad de 0.042 lb/in^3. ¿Cuál es la fracción de volumen de *a*) las fibras de carbono y *b*) la matriz epóxica de la muestra? Suponga que en ésta no hay vacíos.

9.4. En el problema 9.3, ¿cuál es el valor pronosticado para el módulo de elasticidad *a*) en la dirección longitudinal y *b*) en forma perpendicular a las fibras de carbono?

9.5. Un compuesto tiene una matriz de poliéster con fibras de Kevlar 29. Las fracciones de volumen del poliéster y el Kevlar son 60% y 40%, respectivamente. Las fibras de Kevlar tienen un módulo de elasticidad de 60 GPa en dirección longitudinal y 3 GPa en dirección transversal. La matriz de poliéster tiene un módulo de elasticidad de 5.6 GPa en ambas direcciones. *a*) Determine el módulo de elasticidad del compuesto en dirección longitudinal. *b*) Determine el módulo de elasticidad en la dirección transversal.

Parte III
Procesos de solidificación

10 FUNDAMENTOS DE LA FUNDICIÓN DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En esta parte del libro se estudian aquellos procesos de manufactura en los que el material de inicio se encuentra en forma líquida o en condición muy plástica, y se crea un objeto a través de su solidificación. Los procesos de fundición y moldeo dominan esta categoría de operaciones de conformación. En relación con la figura 10.1, los procesos de solidificación se clasifican de acuerdo con el material de ingeniería que se procesa: 1) metales, 2) cerámicos, en específico vidrios,[1] y 3) polímeros y compuestos de matriz de polímero (PMC, por sus siglas en inglés). En este capítulo y el siguiente se cubre la fundición de metales. El trabajo del vidrio se estudia en el capítulo 12 y el procesamiento de polímeros y PMC se trata en los capítulos 13, 14 y 15.

La ***fundición*** es un proceso en el que metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste. El término ***fundición*** también se aplica al objeto que se fabrica por medio de este proceso. Es uno de los procesos más antiguos de conformación, pues se remonta a hace 6 000 años (véase la nota histórica 10.1). El principio de la fundición parece sencillo: se derrite metal, se vierte en un molde y se deja enfriar y solidificar; no obstante, hay muchos factores y variables que deben considerarse a fin de lograr una operación de fundido exitosa.

[1] Entre los cerámicos sólo el vidrio se procesa por solidificación; los cerámicos nuevos y tradicionales reciben su forma con el empleo de procesos de partículas (véase el capítulo 17).

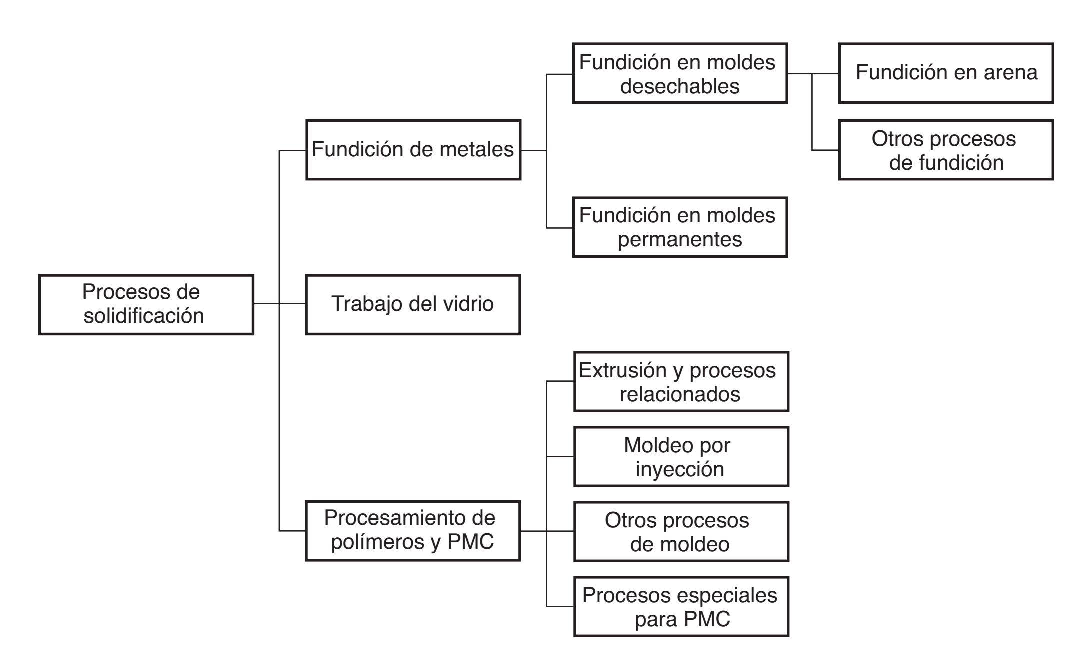


FIGURA 10.1 Clasificación de los procesos de solidificación.

Nota histórica 10.1 *Orígenes de la fundición*

La fundición de metales puede rastrearse hasta alrededor de 4000 a.C. El oro fue el primer metal descubierto y usado por las civilizaciones antiguas; era maleable y se martillaba con facilidad para darle forma a temperatura ambiente. Parecía que no hubiera necesidad de otras maneras para dar forma al oro. Fue el descubrimiento posterior del cobre lo que originó la necesidad de la fundición. Aunque el cobre podía forjarse para darle forma, el proceso era más difícil (debido al endurecimiento por deformación) y se limitaba a formas relativamente simples. Los historiadores creen que transcurrieron cientos de años antes de que el proceso de fundir cobre se llevara a cabo por vez primera, es probable que por accidente durante la reducción del mineral de cobre durante la preparación para martillar el metal en alguna forma útil. Así, por azar, nació el arte de la fundición. Es probable que el descubrimiento ocurriera en Mesopotamia, y la "tecnología" se difundiera con rapidez por el resto del mundo antiguo.

Fue una innovación de importancia significativa en la historia de la humanidad. Con la fundición podían obtenerse formas mucho más intrincadas que por medio del martillado. Era posible fabricar herramientas y armas más sofisticadas. Se obtenían implementos y ornamentos más detallados. Se hacía joyería fina de oro, más bella y valiosa que con los métodos anteriores.

Primero se emplearon aleaciones para fundir, cuando se descubrió que la mezcla de cobre y estaño (la aleación que se formaba era bronce) producía fundidos mucho mejores que el cobre solo. La fundición permitió la creación de riqueza en aquellas naciones que la hacían del mejor modo. Durante la edad de bronce (cerca de 2 000 años), Egipto dominó el mundo civilizado antiguo gracias a su capacidad de efectuar el proceso de fundición.

Durante la Edad Media (de 400 a 1400 d.C.), la religión fue una influencia importante para perpetuar las habilidades del fundidor. La construcción de catedrales y templos requería la fundición de las campanas que se empleaban en esas estructuras. En realidad, el tiempo y esfuerzo necesarios para fundir las grandes campanas de bronce de esa época ayudaron a que el proceso de fundición pasara del ámbito del arte al de la tecnología. Hubo avances en las técnicas de fundición y hechura de moldes. Se mejoró el procedimiento de fundición que consistía en el moldeo por fosos, en el que los moldes se formaban en un pozo profundo ubicado frente al horno para simplificar el proceso de vertido. Además, el fundidor de campanas aprendió la relación que había entre el tono de éstas, que era la medición importante de la calidad del producto, y su tamaño, forma, espesor y composición del metal.

Otro producto importante asociado con el desarrollo de la fundición fue el cañón. Cronológicamente, siguió

a la campana y por ello muchas de las técnicas que se usaron para fundirlas se aplicaban a la fabricación de cañones. El primero de ellos se elaboró en Ghent, Bélgica, en el año 1313. De entre todas las personas posibles, lo hizo un monje. Estaba hecho de bronce y el agujero se formó por medio de un núcleo durante la fundición. Debido a la rugosidad del agujero que se creaba durante el proceso de fundición, estas armas primeras no eran exactas y tenían que dispararse en un rango relativamente corto para que fueran eficaces. Pronto se hizo manifiesto que la exactitud y rango se podrían mejorar si el agujero se hacía suave mediante la maquinación de la superficie. Este proceso de maquinado recibió el nombre muy apropiado de perforado (taladrado) (sección 22.1.5).

La fundición incluye la obtención tanto de lingotes como de formas. El término ***lingote*** por lo general se asocia con las industrias primarias de metales; describe un fundido grande de forma sencilla que se espera adopte otras formas por medio de procesos tales como rolado o forjado. En el capítulo 6 se estudió la formación de lingotes. Una ***fundición de forma*** involucra la producción de formas más complejas que están mucho más cerca de la forma final que se desea que tenga la pieza o producto. Este capítulo y el siguiente tienen que ver más con la fundición de formas que con la de lingotes.

Existe una variedad de métodos de fundición de formas, lo que la hace uno de los procesos de manufactura más versátiles. Entre sus posibilidades y ventajas se encuentran las siguientes:

- La fundición se utiliza para crear formas complejas para las piezas, incluidas externas e internas.
- Algunos procesos de fundición son capaces de producir piezas de ***forma neta***. No se requieren operaciones adicionales de manufactura para obtener la forma y dimensiones requeridas de las piezas. Otros procesos de fundición son de ***forma casi neta***, para las que se necesita algún procesamiento adicional (por lo general, maquinado) para dar forma, a fin de obtener dimensiones y detalles exactos.
- La fundición se emplea para producir piezas muy grandes. Es posible hacer fundidos que pesan más de 100 toneladas.
- El proceso de fundición se lleva a cabo en cualquier metal que pueda calentarse hasta llegar al estado líquido.
- Algunos métodos de fundición son muy apropiados para la producción en masa.

Asociadas con la fundición también hay algunas desventajas, distintas para métodos diferentes. Entre éstas se incluyen limitaciones de las propiedades mecánicas; porosidad, exactitud dimensional y acabado de la superficie defectuosa para ciertos procesos de fundición; peligros para la seguridad de los seres humanos cuando procesan metales fundidos y problemas ambientales.

Las piezas fabricadas con procesos de fundición varían su tamaño desde componentes pequeños que pesan unas cuantas onzas hasta productos muy grandes de varias toneladas. La lista de piezas incluye coronas dentales, joyería, estatuas, estufas para quemar madera, bloques y cabezas de motores para vehículos automotrices, armazones de maquinaria, ruedas de ferrocarril, cacerolas para freír, tubería y carcasas de bombas. Todas las variedades de metales pueden fundirse, ferrosos y no ferrosos.

La fundición también se emplea con materiales tales como polímeros y cerámicos; sin embargo, los detalles son suficientemente distintos como para posponer el estudio de los procesos de fundición de esos materiales a capítulos posteriores. Este capítulo y el siguiente tienen que ver en forma exclusiva con la fundición de metales. En éste se examinan los fundamentos que se aplican prácticamente a todas las operaciones de fundido. En el capítulo que sigue se describen los procesos individuales de fundición, así como algunos de los temas del diseño de productos que deben considerarse cuando se fabrican piezas fundidas.

10.1 PANORAMA DE LA TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN

Como proceso de producción, la fundición se lleva a cabo por lo general en una fundidora. Una ***fundidora*** es una fábrica equipada para hacer moldes, fundir y manejar metal en forma derretida, ejecutar el proceso de fundición y limpiar el fundido terminado. Los trabajadores que llevan a cabo las operaciones de fundido en estas fábricas reciben el nombre de ***fundidores***.

10.1.1 Procesos de fundición

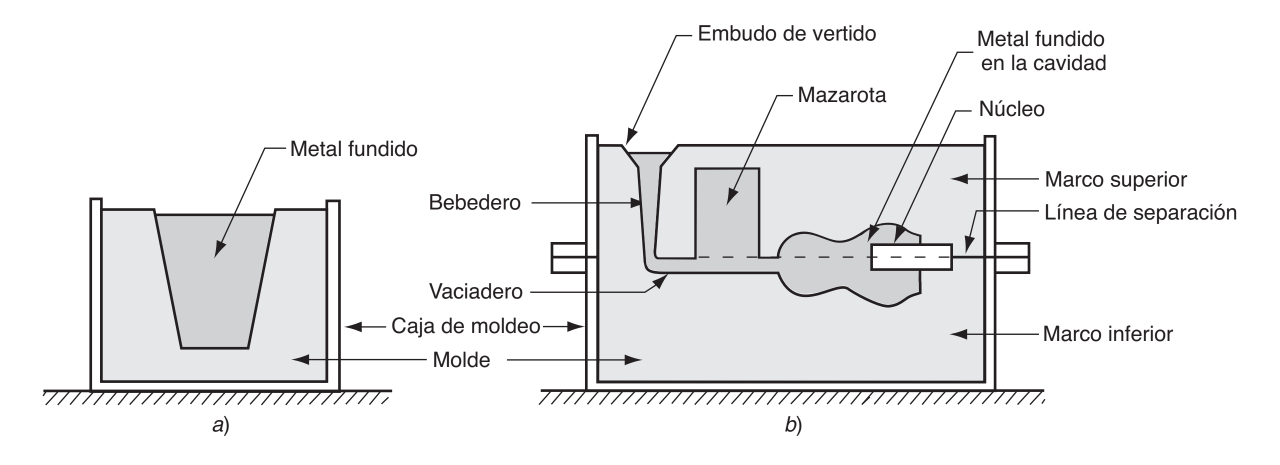
El estudio de la fundición comienza en forma lógica con el molde. El ***molde*** contiene una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma de la pieza fundida. El tamaño y forma reales de la cavidad deben sobredimensionarse un poco para permitir la contracción de metal que ocurre durante la solidificación y enfriamiento. A metales diferentes corresponden cantidades distintas de contracción, por lo que la cavidad del molde debe diseñarse para el metal en particular que se va a fundir, si la exactitud dimensional es de importancia crítica. Los moldes están hechos de varios materiales, que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Es frecuente que los procesos varios de fundición se clasifiquen de acuerdo con estos tipos diferentes de moldes.

Para llevar a cabo la operación de fundido, primero se calienta el metal a una temperatura suficientemente alta que lo transforme por completo al estado líquido. Después se vierte, o se dirige, hacia la cavidad del molde. En un ***molde abierto***, figura 10.2a, el metal líquido simplemente se vierte hasta que llena la cavidad abierta. En un ***molde cerrado***, figura 10.2b, se adapta un pasaje denominado sistema de paso, que permite que el metal derretido fluya desde el exterior del molde hasta la cavidad. El molde cerrado es con mucho la categoría más importante de las operaciones productivas de fundición.

Tan pronto como el metal fundido llega al molde, comienza a enfriarse. Cuando la temperatura baja lo suficiente (por ejemplo, al punto de congelación para un metal puro), empieza a solidificarse. La solidificación involucra un cambio de fase del metal. Se requiere de tiempo para completar el cambio de fase, y en el proceso se pierde una cantidad considerable de calor. Es durante esta etapa del proceso que el metal adopta la forma sólida de la cavidad del molde, y también cuando se establecen muchas de las propiedades y características del fundido.

Una vez que el fundido se ha enfriado lo suficiente, se retira del molde. En función del método de fundido y el metal empleado, podría requerirse un procesamiento adicional.

FIGURA 10.2 Dos formas de molde: *a*) molde abierto es tan sólo un contenedor con la forma de la pieza que se desea y *b*) molde cerrado, en la que la forma del molde es más compleja y requiere un sistema de paso (pasaje) que conduzca a la cavidad.



Esto incluye cortar el exceso de metal de la pieza fundida real, limpiar la superficie, inspeccionar el producto y dar tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, quizá se requiera maquinar (véase el capítulo 22), con objeto de lograr tolerancias más estrechas para ciertas características de las piezas, y eliminar la superficie del fundido.

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías amplias, de acuerdo con el tipo de molde que se emplea: la fundición con molde desechable y la fundición con molde permanente. ***Molde desechable*** significa que el molde en que se solidifica el metal derretido debe destruirse para retirar el fundido. Estos moldes están hechos de arena, yeso o materiales similares, cuya forma se mantiene con el uso de aglutinantes de varias clases. La fundición con arena es el ejemplo más destacado de los procesos con moldes desechables. En la fundición con arena, se vierte metal derretido en un molde de arena. Una vez que el metal se endurece, debe destruirse el molde a fin de recuperar el fundido.

Un ***molde permanente*** es el que se utiliza una vez y otra para producir muchos fundidos. Está hecho de metal (o de un material refractario cerámico, lo que es menos común) que soporte las temperaturas elevadas de la operación de fundido. En la fundición con molde permanente, éste consiste en dos o más secciones que se abren para permitir el retiro de la pieza terminada. El troquel de fundición es el proceso más familiar de este grupo.

Con los procesos de molde desechable por lo general son posibles formas más intrincadas para el fundido. En los procesos con molde permanente las formas de la pieza están limitadas por la necesidad de abrir el molde. Por otro lado, algunos de los procesos con molde permanente tienen ciertas ventajas económicas en operaciones de producción elevada. En el capítulo 11 se estudian los procesos de fundición con moldes desechables y permanentes.

10.1.2 Moldes para fundición en arena

La fundición con arena es por mucho el proceso de fundición más importante. Para describir las características básicas de un molde se usará un molde para fundición en arena. Muchas de estas características y términos son comunes a los moldes que se emplean en otros procesos de fundición. La figura 10.2*b*) muestra la sección transversal de un molde común de fundición de arena, en la que se indica parte de la terminología. El molde consiste en dos mitades: el marco superior y el marco inferior. El ***marco superior*** es la mitad superior del molde y el ***marco inferior*** es la mitad inferior. Estas dos partes del molde están contenidas en una caja, llamada ***caja de moldeo***, que también está dividida en dos mitades, una para el marco superior y la otra para el inferior. Las dos mitades del molde se separan en la ***línea de separación***.

En la fundición con arena (y en otros procesos con moldes desechables), la cavidad del molde se forma por medio de un ***modelo***, hecho de madera, metal, plástico u otro material, y tiene la forma de la pieza por fundir. La cavidad se forma apisonando arena alrededor del modelo, sobre las mitades del marco superior y el inferior, de modo que cuando se retira el modelo, el vacío que queda tiene la forma que se desea para la pieza. El modelo por lo general está sobredimensionado a fin de permitir la contracción del metal cuando éste se solidifica y se enfría. La arena del molde está húmeda y contiene un aglutinante para que conserve su forma.

La cavidad del molde proporciona las superficies externas de la pieza fundida. Además, un fundido puede tener superficies internas. Éstas quedan determinadas por medio de un **núcleo**, forma que se coloca dentro de la cavidad del molde para definir la forma interior de la pieza. En la fundición con arena, los núcleos por lo general están hechos también de arena, aunque pueden emplearse otros materiales tales como metales, yeso y cerámicos.

El ***sistema de paso*** de un molde de fundición es el canal, o red de canales, por los que fluye el metal derretido desde el exterior hacia la cavidad. Como se aprecia en la figura, es común que el sistema de paso conste de un ***bebedero de vertido*** (también llamado sólo ***bebedero***), por la que el metal ingresa por un ***vaciadero*** que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero, es frecuente que se use un ***embudo de vertido***

para minimizar las salpicaduras y turbulencia conforme el metal fluye en el bebedero. En el diagrama aparece como un embudo sencillo en forma de cono. Algunos embudos de vertido están diseñados en forma de tazón, con un canal abierto que lleva al bebedero.

Además del sistema de paso, cualquier fundido en el que la contracción sea significativa requiere una mazarota conectada a la cavidad principal. La ***mazarota*** es un almacenamiento en el molde que sirve como fuente de metal líquido para que el fundido compense la contracción durante la solidificación. La mazarota debe estar diseñada para que se solidifique después del fundido principal a fin de que cumpla su función.

Conforme el metal pasa al molde, el aire que ocupaba en forma previa la cavidad, o bien los gases calientes que se forman por las reacciones del metal fundido, deben ser evacuados de modo que el metal llene por completo el espacio vacío. Por ejemplo, en la fundición con arena la porosidad natural de ésta permite que el aire y los gases escapen a través de las paredes de la cavidad. En los moldes permanentes de metal se perforan pequeños agujeros en el molde, o se maquinan hacia la línea de separación, para permitir la salida del aire y gases.

10.2 CALENTAMIENTO Y VERTIDO

Para llevar a cabo una operación de fundido, el metal debe calentarse a una temperatura algo más elevada que su punto de fusión y luego verterse a la cavidad del molde para que se solidifique. En esta sección se estudian aspectos diversos de estas dos etapas de la fundición.

10.2.1 Calentamiento del metal

Para calentar el metal a una temperatura de fusión suficiente para la fundición se utilizan hornos de varias clases (véase la sección 11.4.1). La energía calorífica que se requiere es la suma de 1) el calor para elevar la temperatura al punto de fusión, 2) el calor de fusión para convertirlo de sólido a líquido y 3) el calor para poner el metal fundido a la temperatura deseada para verterlo. Esto se expresa así:

$$H = \rho V\{C_s(T_m - T_o) + H_f + C_l(T_p - T_m)\} \tag{10.1}$$

donde H = calor total que se requiere para subir la temperatura del metal a la temperatura a que se vierte, J (Btu); ρ = densidad, g/cm^3 (lbm/in^3); C_s = calor específico por peso para el metal sólido, J/g-C (Btu/lbm-F); T_m = temperatura de fusión del metal, C (F); T_o = temperatura de inicio, la ambiental, por lo general, C (F); H_f = calor de fusión, J/g (Btu/lbm); C_l = calor específico por peso del metal líquido, J/g-C (Btu(lbm-F); T_p = temperatura de vertido, C (F); y V = volumen del metal que se calienta, cm^3 (in^3).

Ejemplo 10.1 Calentamiento de metal para fundición

Un metro cúbico de cierta aleación eutéctica se calienta en un crisol, desde la temperatura ambiente a 100 ºC por arriba de su punto de fusión para fundirlo. La densidad de la aleación es de 7.5 g/cm^3, el punto de fusión es de 800 ºC, calor específico de 0.33 J/g °C en estado sólido y 0.29J/g °C en estado líquido; y el calor de fusión es de 160 J/g. ¿Cuánta energía calorífica debe agregarse para completar el calentamiento si se supone que no hay pérdidas?

Solución: Se supone que en la fundidora la temperatura ambiente es de 25 ºC y que la densidad de los estados líquido y sólido del metal es la misma. Como un m^3 es igual a 10^6 cm^3, al sustituir los valores apropiados en la ecuación (10.1) se tiene que

$$H = (7.5)(10^6)\{0.33(800 - 25) + 160 + 0.29(100)\} = 3335(10^6)\text{J}$$

La ecuación anterior tiene valor conceptual; sin embargo, su valor de cálculo es limitado y no representa al ejemplo del cálculo. El empleo de la ecuación (10.1) es complicado por los factores siguientes: 1) el calor específico y otras propiedades térmicas del metal

sólido varían con la temperatura, en especial si el metal sufre un cambio de fase durante el calentamiento. 2) El calor específico de un metal puede ser diferente en los estados sólido y líquido. 3) La mayoría de los metales que se funden son aleaciones, y la mayor parte de éstas se funden por arriba de una temperatura que varía entre la de solidus y liquidus, más bien que con un solo punto de fusión; así, el calor de fusión no puede aplicarse en forma tan simple como la que se ilustró. 4) En la mayoría de los casos, no se dispone de los valores apropiados que se requieren en la ecuación para una aleación particular. 5) Existen pérdidas caloríficas significativas hacia el ambiente durante el calentamiento.

10.2.2 Vertido del metal fundido

Después del calentamiento, el metal está listo para verterlo. La introducción del metal derretido en el molde, que incluye el flujo a través del sistema de paso y hacia la cavidad, es una etapa crítica del proceso de fundición. Para que esta etapa tenga éxito, el metal debe fluir hacia todas las regiones del molde antes de solidificarse. Los factores que afectan la operación de vertido incluyen los siguientes: temperatura a la que se vierte, velocidad de vertido y turbulencia.

La ***temperatura de vertido*** es aquella que tiene el metal derretido cuando se introduce al molde. Lo que importa aquí es la diferencia entre la temperatura a que se vierte y la que tiene al comenzar la solidificación (el punto de fusión para un metal puro, o la temperatura de liquidus para una aleación). Esta diferencia de temperatura en ocasiones se conoce como la de ***sobrecalentamiento***. Este término también se emplea para la cantidad de calor que debe retirarse del metal derretido entre el vertido y el inicio de la solidificación [6].

La ***velocidad de vertido*** se refiere a la tasa volumétrica a la que se vierte el metal fundido al molde. Si la tasa es demasiado baja, el metal se enfriará y solidificará antes de llenar la cavidad. Si la tasa de vertido es excesiva, la turbulencia se vuelve un problema serio. La ***turbulencia*** en el flujo de un fluido se caracteriza por variaciones erráticas en la magnitud y dirección de la velocidad en el fluido. El flujo se agita y es irregular en vez de ser suave y seguir líneas de corriente, como ocurre con el flujo laminar. Debe evitarse el flujo turbulento durante el vertido, por varias razones. Tiende a acelerar la formación de óxidos de metal que pueden quedar atrapados durante la solidificación, lo que degrada la calidad del fundido. La turbulencia también agrava la ***erosión del molde***, que es la pérdida gradual de superficies del molde debido al impacto del flujo de metal derretido. Las densidades de la mayoría de los metales que se funden son mucho mayores que la del agua y otros fluidos que se estudia normalmente. Estos metales fundidos también tienen una química mucho más reactiva que cuando se encuentran a temperatura ambiente. En consecuencia, el desgaste ocasionado por el flujo de ellos en el molde es significativo, en especial en condiciones de turbulencia. La erosión es seria en especial si ocurre en la cavidad principal debido a que la forma de la pieza fundida resulta afectada.

10.2.3 Análisis de ingeniería del vertido

Hay varias relaciones que gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de paso y dentro del molde. Una importante es el ***teorema de Bernoulli***, que establece que la suma de las energías (piezométrica, presión, cinética y fricción) en dos puntos cualesquiera de un líquido que fluye son iguales. Esto se escribe de la forma siguiente:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \tag{10.2}$$

donde h = altura piezométrica, cm (in); p = presión del líquido, N/cm^2 (lb/in^2); ρ = densidad, g/cm^3 (lbm/in^3); v = velocidad de flujo, cm/s (in/s); g = constante de la aceleración de la gravedad, 981 cm/s/s (32.2 × 12 = 386 in/s/s); y F = pérdidas piezométricas debidas a la fricción, cm (in). Los subíndices 1 y 2 indican dos ubicaciones cualesquiera en el flujo del líquido.

La ecuación de Bernoulli se simplifica de varias maneras. Si se ignoran las pérdidas por fricción (seguramente, la fricción afectará el flujo del líquido a través de un molde de arena) y se supone que entre tanto el sistema permanece a presión atmosférica, entonces la ecuación se reduce a

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \tag{10.3}$$

Esto se utiliza para determinar la velocidad del metal derretido en la base del bebedero. Se define como punto 1 la parte superior de la mazarota, y punto 2 la base. Si el punto 2 se usa como el plano de referencia, entonces la altura piezométrica en él es igual a cero ($h_2 = 0$) y h_1 es la altura (longitud) de la entrada. Cuando el metal se vierte en el embudo y fluye por el bebedero, su velocidad inicial en la parte superior es de cero ($v_1 = 0$). Así, la ecuación (10.3) se simplifica aún más y queda

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g}$$

que se resuelve para la velocidad de flujo:

$$v = \sqrt{2gh} \tag{10.4}$$

donde v = velocidad del metal líquido en la base de la mazarota, cm/s (in/s); g = 981 cm/s/s (386 in/s/s); y h = altura del bebedero, cm (in).

Otra relación importante durante el vertido es la ***ley de continuidad***, que establece que la tasa de flujo volumétrico permanece constante a través del líquido. El gasto volumétrico es igual a la velocidad multiplicada por el área de la sección transversal del líquido que fluye. La ley de la continuidad se expresa como:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \tag{10.5}$$

donde Q = gasto volumétrico, cm^3/s (in^3/s); v = velocidad; A = área de la sección transversal del líquido, cm^2 (in^2); y los subíndices se refieren a dos puntos cualesquiera del sistema de flujo. Así, un incremento del área da lugar a una disminución de la velocidad, y viceversa.

Las ecuaciones (10.4) y (10.5) indican que el bebedero debe ser ahusado. Conforme el metal acelera durante su descenso por la abertura del bebedero, el área de la sección transversal del canal debe reducirse; de otro modo, mientras la velocidad del metal aumenta en su camino hacia la base del bebedero, el líquido podría aspirar aire y llevarlo a la cavidad del molde. Para impedir esta condición, el bebedero se diseña con un ahusamiento, de modo que el gasto volumétrico vA siempre es el mismo en las partes superior e inferior de ella.

Si se supone que el vaciadero que va de la base del bebedero a la cavidad del molde es horizontal (y por tanto la altura piezométrica h es la misma que en la base del bebedero), entonces el gasto volumétrico a través del paso hacia la cavidad del molde permanece igual a vA en la base. En consecuencia, es posible estimar el tiempo que se requiere para llenar la cavidad de un molde de volumen V, así:

$$T_{MF} = \frac{V}{Q} \tag{10.6}$$

donde T_{MF} = tiempo de llenado del molde, s; V = volumen de la cavidad del molde, cm^3 (in^3); y Q = gasto volumétrico. El tiempo de llenado del molde calculado por medio de la ecuación (10.6) debe considerarse un tiempo mínimo. Esto se debe a que el análisis ignora las pérdidas por fricción y la posible obstrucción del flujo en el sistema de paso; así, el tiempo de llenado del molde debe ser mayor que el que se obtiene con la ecuación (10.6).

Ejemplo 10.2 Cálculos del vertido

El bebedero de un molde mide 20 cm de largo, y el área de la sección transversal en su base es de 2.5 cm^2. El bebedero alimenta un vaciadero horizontal que conduce a la cavidad de un molde cuyo volumen es de 1 560 cm^3. Determine: *a*) la velocidad del metal derretido

en la base del bebedero, *b*) la tasa de flujo volumétrico, y *c*) el tiempo que toma llenar el molde.

Solución: *a*) La velocidad del flujo de metal en la base de la entrada está dada por la ecuación (10.4):

$$v = \sqrt{2(981)(20)} = 198.1 \text{ cm/s}$$

b) El gasto volumétrico es

$$Q = (2.5 \text{ cm}^2)(198.1 \text{ cm/s}) = 495 \text{ cm}^2/\text{s}$$

c) El tiempo que se requiere para llenar la cavidad de un molde de 100 in^3 con ese gasto es

$$T_{MF} = 1560 / 495 = 3.2 \text{ s}$$

10.2.4 Fluidez

Es frecuente que las características del flujo de un metal derretido se describan con el término ***fluidez***, medida de la capacidad de un metal para fluir hacia un molde y llenarlo antes de solidificarse. La fluidez es el inverso de la viscosidad (véase la sección 3.4); conforme la viscosidad se incrementa, la fluidez disminuye. Existen métodos estándar de prueba para evaluar la fluidez, incluida la prueba del molde espiral que se ilustra en la figura 10.3, en el que la fluidez queda indicada por la longitud del metal que se solidifica en el canal espiral. Una espiral más larga de fundido significa fluidez mayor del metal derretido.

Los factores que afectan la fluidez incluyen la temperatura de vertido respecto del punto de fusión, la composición del metal, la viscosidad del metal líquido y la transferencia de calor al ambiente. Una temperatura de vertido más elevada respecto del punto de solidificación del metal aumenta el tiempo que permanece en estado líquido, lo que permite que fluya más antes de solidificarse. Esto tiende a agravar ciertos problemas del fundido tales como la formación de óxidos, porosidad por gases y penetración de metal líquido en los espacios intersticiales entre los granos de arena que forman el molde. Este último problema ocasiona que la superficie del fundido contenga partículas de arena incrustadas, lo que la hace más áspera y abrasiva que lo normal.

La composición también afecta la fluidez, en particular respecto al mecanismo de solidificación del metal. La mejor fluidez se obtiene con metales que se solidifican a temperatura constante (por ejemplo, metales puros y aleaciones eutécticas). Cuando la solidificación ocurre en un rango de temperatura (la mayor parte de aleaciones pertenecen a esta categoría), la porción solidificada en forma parcial interfiere con el flujo de la porción líquida, lo que reduce la fluidez. Además del mecanismo de solidificación, la composición del metal también determina el ***calor de fusión***, la cantidad de calor que se requiere para solidificar el metal a partir de su estado líquido. Un calor de fusión más elevado tiende a incrementar la medida de la fluidez en la fundición.

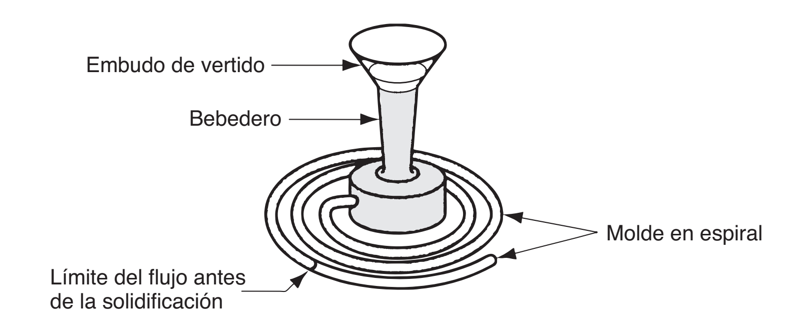


FIGURA 10.3 Prueba del molde espiral para la fluidez, en la que ésta se mide como la longitud del canal espiral que se llena con metal derretido antes de que ocurra la solidificación.

10.3 SOLIDIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO

Después de que se vierte al molde, el metal derretido se enfría y solidifica. En esta sección se estudia el mecanismo físico de la solidificación que ocurre durante la fundición. Los temas asociados con ella incluyen el tiempo que necesita un metal para solidificarse, las contracciones, la solidificación direccional y el diseño de la mazarota.

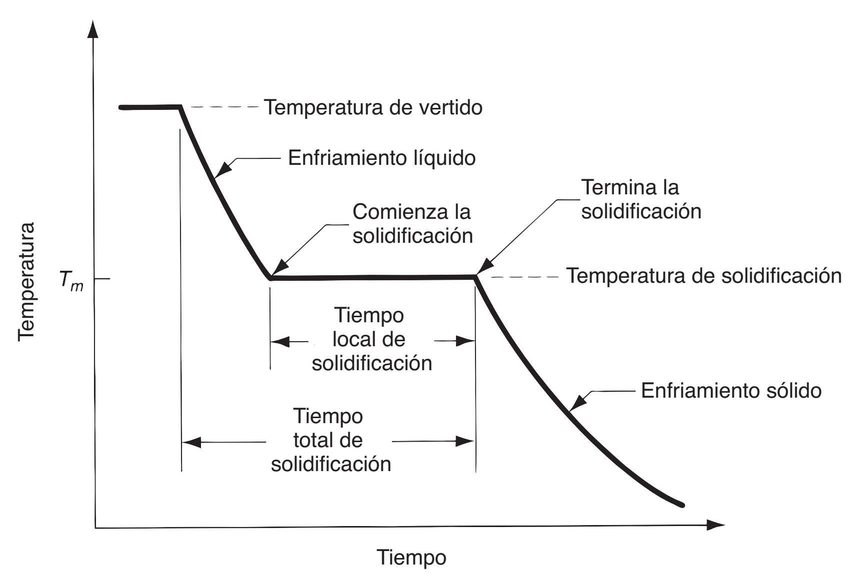
10.3.1 Solidificación de los metales

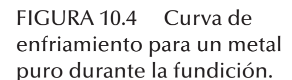
La solidificación involucra la transformación del metal derretido de nuevo al estado sólido. El proceso de solidificación difiere en función de si el metal es un elemento puro o una aleación.

Metales puros Un metal puro se solidifica a una temperatura constante igual a su punto de adhesión, el cual es el mismo punto de fusión. Los puntos de fusión de los metales puros se conocen y están bien documentados (véase la tabla 4.1). El proceso ocurre a lo largo del tiempo, como se ilustra en la gráfica que aparece en la figura 10.4, que se denomina curva de enfriamiento. La solidificación real toma tiempo, llamado ***tiempo local de solidificación*** del fundido, durante el cual el calor de fusión latente del metal se libera hacia el molde que lo rodea. El ***tiempo total de solidificación*** es aquel que transcurre entre el vertido y la solidificación completa. Después de que el fundido se ha solidificado por completo, el enfriamiento continúa a la tasa indicada por la pendiente hacia abajo de la curva de enfriamiento.

Debido a la acción enfriadora de la pared del molde, al principio se forma una capa delgada de metal sólido en la interfaz inmediatamente después del vertido. El espesor de esta capa se incrementa y forma una costra alrededor del metal derretido conforme la solidificación avanza hacia el centro de la cavidad. La tasa a la que la solidificación sucede depende de la transferencia de calor al molde, así como de las propiedades térmicas del metal.

Es de interés examinar la formación de granos metálicos y su crecimiento durante el proceso de solidificación. El metal que forma la capa inicial se ha enfriado con rapidez por la extracción de calor a través de la pared del molde. Esta acción de enfriamiento ocasiona que los granos de la capa sean finos, de ejes iguales y orientados al azar. Conforme el enfriamiento continúa, se forman más granos y crecen en dirección opuesta a la de la transferencia de calor. Como ésta ocurre a través de la capa y pared del molde, los granos




FIGURA 10.4 Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición.

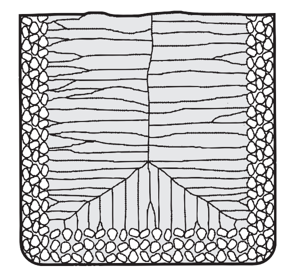


FIGURA 10.5 Estructura característica de los granos en un fundido de metal puro, en la que se ilustran los granos de tamaño pequeño orientados al azar cerca de la pared del molde, y granos grandes alargados orientados hacia el centro del fundido.

crecen hacia el interior como agujas o espinas de metal sólido. Conforme estas espinas crecen se forman ramas laterales, y mientras éstas también crecen se forman otras ramas a ángulos rectos de las primeras. Este tipo de crecimiento de granos se conoce como ***crecimiento dendrítico***, y ocurre no sólo en la solidificación de los metales puros sino también en la de aleaciones. Estas estructuras parecidas a árboles se llenan en forma gradual durante la solidificación, conforme se deposita más metal en las dendritas, hasta que ocurre la solidificación completa. Los granos que resultan de este crecimiento dendrítico adoptan una orientación preferente, tienden a ser gruesos y hay granos alargados en dirección del centro del fundido. En la figura 10.5 se ilustra la formación de granos que resulta.

Mayoría de aleaciones La mayor parte de aleaciones se solidifican en un rango de temperaturas en vez de a una temperatura única. El rango exacto depende del sistema de aleación y la composición particular. La solidificación de una aleación se explica con auxilio de la figura 10.6, que muestra el diagrama de fase para un sistema particular de aleación (véase la sección 6.1.2) y la curva de enfriamiento para una composición dada. Conforme la temperatura cae, comienza la solidificación a la temperatura indicada por el ***liquidus*** y termina cuando se alcanza el ***solidus***. El comienzo de la solidificación es similar a la de un metal puro. Se forma una capa delgada en la pared del molde debido al gradiente de temperatura mayor en esa superficie. Luego, la solidificación continúa igual que se describió antes, con la formación de dendritas que crecen hacia afuera de las paredes. Sin embargo, debido a la dispersión de temperatura entre el liquidus y el solidus, la naturaleza del crecimiento dendrítico es tal que se forma una zona de avance en la que coexiste metal tanto líquido como sólido. Las porciones sólidas son las estructuras dendríticas que se formaron lo suficiente como para atrapar islas pequeñas de metal

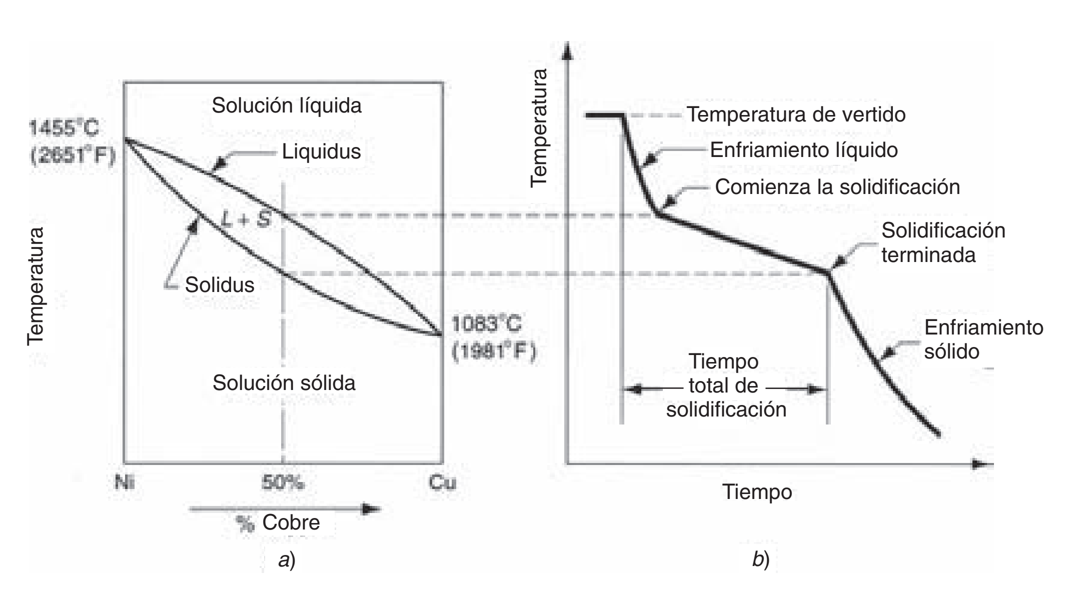


FIGURA 10.6 *a*) Diagrama de fase para un sistema de aleación cobre-níquel y *b*) curva de enfriamiento asociada para una composición de 50% Ni y 50% Cu, durante la fundición.

líquido en la matriz. Esta región sólida-líquida tiene consistencia suave que ha dado lugar a su nombre de ***zona blanda***. En función de las condiciones de solidificación, la zona blanda puede ser relativamente angosta, o existir a través de la mayor parte del fundido. Esta última condición la favorecen factores tales como la transferencia lenta de calor a partir del metal caliente, y una diferencia grande entre las temperaturas del liquidus y el solidus. En forma gradual, las islas de líquido en la matriz dendrítica se solidifican conforme disminuye la temperatura del fundido hacia la de solidus para la composición de la aleación dada.

Otro factor que complica la solidificación de las aleaciones es que cuando comienzan a formarse las dendritas su composición favorece al metal con el punto de fusión más elevado. En tanto la solidificación continúa y las dendritas crecen, se desbalancea la composición entre el metal que ya se solidificó y el restante que sigue derretido. Este desbalanceo en la composición se manifiesta al final, en el fundido terminado, en forma de la segregación de los elementos. La segregación es de dos tipos, microscópica y macroscópica. Microscópicamente, la composición química varía entre los granos individuales. Esto se debe al hecho de que la espina inicial de cada dendrita tiene una proporción mayor de uno de los elementos de la aleación. Conforme las dendritas crecen, deben expandirse con el uso del metal líquido restante que ha disminuido parcialmente del primer componente. Al final, el último metal en solidificarse en cada grano es el que ha sido atrapado por las ramas de las dendritas, y su composición está aún más fuera de balance. Así, se tiene una variación de la composición química dentro de los granos individuales del fundido.

Macroscópicamente, la composición química varía en todo el fundido. Como sus regiones que se solidificaron primero (hacia fuera, cerca de las paredes del molde) son más ricas en un componente que en otro, la aleación derretida restante queda privada de él en el momento en que ocurre la solidificación en el interior. Así, hay una segregación general a través de la sección transversal del fundido, que a veces se denomina ***segregación de lingote***, como se ilustra en la figura 10.7.

Aleaciones eutécticas Éstas constituyen una excepción al proceso general por el que se solidifican las aleaciones. Una ***aleación eutéctica*** es una composición particular de un sistema de aleación para el que el solidus y el liquidus están a la misma temperatura. Así, la solidificación ocurre a temperatura constante en lugar de en un rango, como se describió antes. El efecto se observa en el diagrama de fase del sistema plomo-estaño que aparece en la figura 6.3. El plomo puro tiene un punto de fusión de 327 ºC (621 ºF), mientras que el estaño puro se funde a 232 ºC (450 ºF). Aunque la mayor parte de las aleaciones plomo-estaño presentan el rango de temperatura frecuente solidus-liquidus, la composición particular de 61.9% de estaño y 38.1% de plomo tiene un punto de fusión (solidificación) de 183 ºC (362 ºF). Esta composición es la ***composición eutéctica*** del sistema de la aleación plomo-estaño, y 183 ºC es su ***temperatura eutéctica***. No es común utilizar aleaciones plomo-estaño para hacer fundiciones, pero las aleaciones Pb-Sn casi eutécticas se emplean en las soldaduras eléctricas, en las que el punto de fusión bajo es una ventaja. Algunos ejemplos de aleaciones eutécticas que se encuentran en la fundición incluyen aluminio-silicio (11.6%) y hierro fundido (4.3% de C).

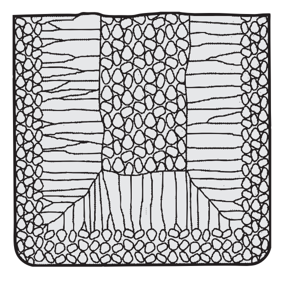


FIGURA 10.7 Estructura de grano característica de un fundido de aleación, en la que se aprecia la segregación de los componentes de la aleación en el centro del fundido.

10.3.2 Tiempo de solidificación

Sea que el fundido consista en un metal puro o en una aleación, la solidificación toma tiempo. El tiempo total de solidificación es el que se requiere para que el fundido se solidifique después del vertido. Este tiempo depende del tamaño y forma del fundido, en una relación empírica conocida como ***regla de Chvorinov***, que establece lo siguiente:

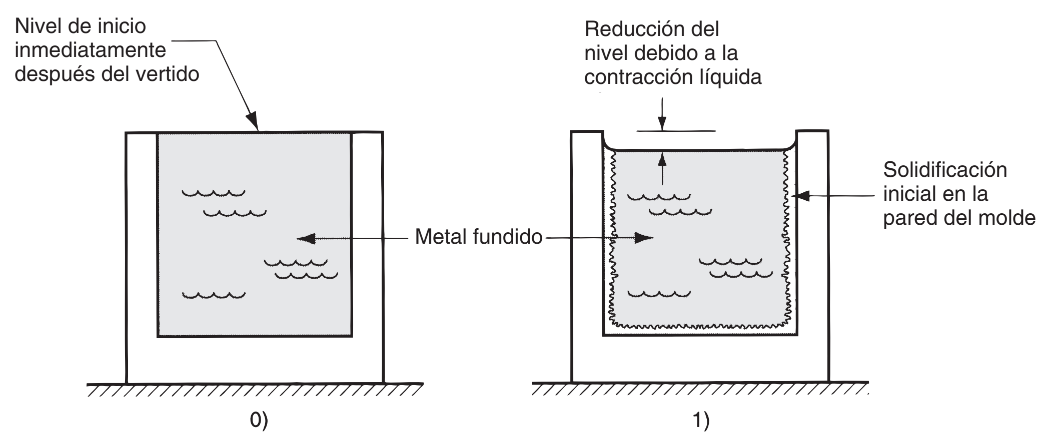
$$T_{TS} = C_m\left(\frac{V}{A}\right)^n \tag{10.7}$$

donde T_{TS} = tiempo total de solidificación, min; V = volumen del fundido, cm^3 (in^3); A = área de la superficie del fundido, cm^2 (in^2); n es un exponente que por lo general se acepta que tiene un valor de 2; y C_m es la ***constante del molde***. Dado que $n = 2$, las unidades de C_m son min/cm^2 (min/in^2), y su valor depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, incluido el material del molde (por ejemplo, calor específico, conductividad térmica), propiedades térmicas del metal que se funde (por ejemplo, calor de fusión, calor específico, conductividad térmica) y la temperatura de vertido respecto al punto de fusión del metal. El valor de C_m para una operación de fundido se basa en datos experimentales de operaciones anteriores efectuadas con el empleo del mismo material del molde, metal, y temperatura de vertido, aun si la forma de la pieza fuera muy diferente.

La regla de Chvorinov indica que un fundido con una razón grande de volumen a superficie se enfriará y solidificará con más lentitud que otra con una razón menor. Este principio se emplea para diseñar la mazarota de un molde. Para que desempeñe su función de alimentar el metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase sólida más tiempo que el fundido. En otras palabras la T_{TS} para la mazarota debe exceder la T_{TS} del fundido principal. Como las condiciones del molde son las mismas tanto para la mazarota como para el fundido, sus constantes de molde deben ser iguales. Si se diseña la mazarota para que tenga una razón mayor de volumen a área, se puede tener seguridad razonable en que el fundido principal se solidifique primero y que los efectos de la contracción se minimicen. Antes de considerar la manera en que se diseña la mazarota con la regla de Chvorinov, se estudiará el tema de la contracción, que es la razón por la que se necesitan las mazarotas.

10.3.3 Contracción

El estudio presente de la solidificación ha ignorado el efecto de la contracción que tiene lugar durante el enfriamiento y solidificación. La contracción ocurre en tres etapas: 1) contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación, 2) contracción durante el cambio de fase de líquida a sólida, llamada ***contracción por solidificación***, y 3) contracción térmica del fundido solidificado durante el enfriamiento a temperatura ambiente. Las tres etapas se explican en relación con un fundido cilíndrico hecho en un molde abierto, como se ilustra en la figura 10.8. El metal fundido inmediatamente después del vertido aparece en el inciso 0 de la serie. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento desde la temperatura de vertido hasta la de solidificación hace que la altura del líquido se reduzca de su nivel inicial, como se ilustra en el inciso 1 de la figura. La cantidad de esta contracción líquida por lo general es de alrededor de 0.5%. La contracción por solidificación que se observa en el inciso 2 tiene dos efectos. En primer lugar, ocasiona una reducción adicional en la altura del fundido. En segundo, la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción central superior del fundido se ve restringida. En general ésta es la última región que se solidifica, y la ausencia de metal crea un vacío en esa ubicación del fundido. Los trabajadores de la fundición llaman ***rechupe*** a esa cavidad por contracción. Una vez que se solidifica, el fundido experimenta más contracción de su altura y diámetro durante su enfriamiento, como se aprecia en el inciso 3 de la figura. Esta contracción está determinada por el coeficiente de expansión térmica del metal, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.



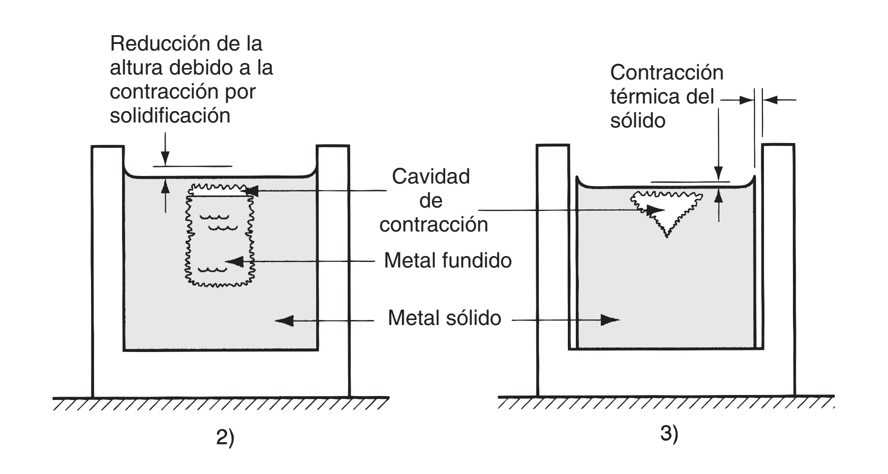


FIGURA 10.8 Contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento: 0) nivel de inicio del metal fundido inmediatamente después del vertido, 1) reducción del nivel ocasionado por la contracción líquida durante el enfriamiento, 2) disminución de la altura y formación de una cavidad de contracción ocasionada por la contracción de la solidificación y 3) reducción adicional de la altura y diámetro debido a la contracción térmica durante el enfriamiento del metal sólido. Por claridad, las reducciones dimensionales se han exagerado en los dibujos.

En la tabla 10.1 se presentan algunos valores comunes de contracción volumétrica para distintos metales de fundición, debido a la contracción por solidificación y a la contracción del sólido, etapas 2 y 3. La contracción por solidificación ocurre en casi todos los metales porque la fase sólida tiene una densidad mayor que la líquida. La transformación de fase que acompaña a la solidificación ocasiona una reducción del volumen por unidad de peso del metal. La excepción de la tabla 10.1 es el hierro colado con alto contenido de carbono, cuya solidificación se complica por la existencia de un periodo de grafitización durante las

TABLA 10.1 Contracción volumétrica para distintos metales de fundición, debido a la contracción por solidificación y a la del sólido.

	Contracción volumétrica debida a:	
Metal	Contracción por solidificación, %	Contracción térmica del sólido, %
Aluminio	7.0	5.6
Aleación de aluminio (común)	7.0	5.0
Hierro colado gris	1.8	3.0
Hierro colado gris, alto C	0	3.0
Acero fundido al bajo C	3.0	7.2
Cobre	4.5	7.5
Bronce (Cu-Sn)	5.5	6.0

Recopilada a partir de la referencia [3].

etapas finales de la solidificación, lo que origina una expansión que tiende a compensar la disminución volumétrica que se asocia con el cambio de fase [6].

Los modelistas intervienen en la contracción por solidificación y en la térmica, porque hacen que las cavidades del molde aumenten su tamaño. La cantidad en la que el molde debe hacerse más grande en relación con el tamaño del fundido final se denomina ***tolerancia por contracción del modelo***. Aunque la contracción es volumétrica, las dimensiones del fundido casi siempre se expresan linealmente, por lo que las tolerancias deben aplicarse en concordancia. Para hacer los modelos y moldes más grandes que el fundido que se desea en la cantidad apropiada, se usan "reglas de contracción" especiales con escalas elongadas ligeramente. En función del metal que se va a fundir, estas reglas de contracción son entre 1% y 5% mayores que la regla estándar.

10.3.4 Solidificación direccional

A fin de minimizar los efectos del daño que causa la contracción, es deseable que las regiones del fundido más lejos del suministro de metal líquido se solidifiquen primero, y que este proceso avance desde ellas hacia la(s) mazarota(s). De esta manera, se dispone en forma continua de metal derretido en los vertedores para impedir que se formen vacíos de contracción durante la solidificación. El término ***solidificación direccional*** se utiliza para describir este aspecto del proceso de solidificación y los métodos con los que se controla. La solidificación direccional deseada se logra aplicando la regla de Chvorinov en el diseño del fundido en sí, su orientación dentro del molde y el diseño del sistema de la mazarota que lo alimenta. Por ejemplo, si se colocan secciones del fundido con razones V/A menores lejos de la mazarota, la solidificación ocurrirá primero en esas regiones y el suministro de metal líquido para el resto del fundido permanecerá abierto hasta que se solidifiquen dichas secciones voluminosas.

Otra manera de facilitar la solidificación direccional es el empleo de ***enfriadores***, sumideros de calor internos o externos que ocasionan el enfriamiento rápido de ciertas regiones del fundido. Los ***enfriadores internos*** son piezas metálicas pequeñas que se sitúan dentro de la cavidad antes del vertido, de modo que el metal derretido se solidificará primero alrededor de ellas. El enfriador interno debe tener una composición química similar a la del metal que se vierte, lo que se logra con mayor facilidad si se le fabrica del mismo metal que el fundido mismo.

Los ***enfriadores externos*** son inserciones de metal en las paredes de la cavidad del molde, que absorben calor del metal fundido con más rapidez que la arena circundante a fin de que faciliten la solidificación. Se usan con frecuencia con eficacia en secciones del fundido que son difíciles de alimentar con metal derretido, con lo que se facilita la solidificación rápida de esas secciones mientras la conexión al metal líquido sigue abierta. En la figura 10.9 se ilustra una aplicación posible de enfriadores externos y el resultado probable en el fundido si no se emplearan.

Tan importante como el inicio de la solidificación en regiones apropiadas de la cavidad, es evitar la solidificación prematura en las secciones del molde más cerca de la mazarota. El pasaje entre la mazarota y la cavidad principal tiene importancia particular.

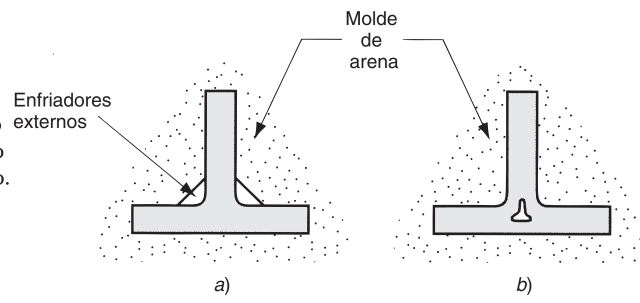


FIGURA 10.9 *a*) Enfriador externo para favorecer la solidificación rápida del metal derretido en una sección delgada del fundido y *b*) resultado probable si no se usara el enfriador externo.

Esta conexión debe diseñarse de modo que no se solidifique antes que el fundido, lo que aislaría al fundido del metal fundido de la mazarota. Aunque por lo general es deseable minimizar el volumen en la conexión (para reducir el desperdicio de metal), el área de la sección transversal debe ser suficiente a fin de retrasar la solidificación. Este objetivo se facilita si se hace corto el pasaje, de modo que absorba calor del metal fundido en la mazarota y en el fundido.

10.3.5 Diseño de la mazarota

Como ya se describió, la mazarota (véase la figura 10*b*) se emplea en un molde de fundición con arena para alimentar el metal líquido al fundido durante la solidificación, con objeto de compensar la contracción por solidificación. Para que funcione, la mazarota debe permanecer derretida hasta después de que el fundido se solidifica. La regla de Chvorinov se utiliza para calcular el tamaño de la mazarota que satisfará ese requerimiento. El ejemplo siguiente ilustra el cálculo.

Ejemplo 10.3 Diseño de la mazarota con la regla de Chvorinov

Debe diseñarse la mazarota cilíndrica para un molde de fundición en arena. El fundido en sí es una placa rectangular de acero con dimensiones de 7.5 cm × 12.5 cm × 2.0 cm. Observaciones anteriores indican que el tiempo total de solidificación (T_{TS}) para este fundido es de 1.6 min. La mazarota cilíndrica tendrá una relación diámetro a altura de 1.0. Determine las dimensiones del vertedor de modo que T_{TS} = 2.0 min.

Solución: En primer lugar se determina la relación V/A para la placa. Su volumen es V = 7.5 × 12.5 × 2.0 = 187.5 cm³ y el área de su superficie es A = 2(7.5 × 12.5 + 7.5 × 2.0 + 12.5 × 2.0) = 267.5 cm². Dado que T_{TS} = 1.6 min, se determina la constante del molde, C_m, a partir de la ecuación (10.7), con el uso de un valor de n = 2 en ella.

$$C_m = \frac{T_{TS}}{(V/A)^2} = \frac{1.6}{(187.5/267.5)^2} = 3.26 \text{ min/cm}^2$$

A continuación debe diseñarse la mazarota de modo que su tiempo total de solidificación sea de 2.0 min, con el empleo del mismo valor de la constante del molde. El volumen de la mazarota está dado por

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

y el área de la superficie está dada por $A = \pi Dh + \dfrac{2\pi D^2}{4}$

Como se está usando una razón D/H = 1.0, entonces, $D = H$. Al sustituir D por H en las fórmulas del volumen y área, se obtiene

$$V = \pi D^3/4$$

y

$$A = \pi D^2 + 2\pi D^2/4 = 1.5\pi D^2$$

Así, la razón $V/A = D/6$. Con el uso de esta razón en la ecuación de Chvorinov, se tiene

$$T_{TS} = 2.0 = 3.26\left(\frac{D}{6}\right)^2 = 0.09056\, D^2$$

$$D^2 = 2.0/0.09056 = 22.086 \text{ cm}^2$$

$$D = 4.7 \text{ cm}$$

Como $H = D$, entonces también H = 4.7 cm.

La mazarota representa un desperdicio de metal que debe separarse de la pieza fundida y volverse a fundir en operaciones posteriores. Es deseable que el volumen de metal

en la mazarota sea mínimo. Como la forma de la mazarota normalmente se selecciona para maximizar la razón V/A, esto tiende a reducir el volumen de aquél tanto como sea posible. Obsérvese que el volumen de la mazarota del ejemplo es $V = \pi(4.7)^3/4 = 81.5$, que es sólo 44% del volumen de la placa (fundido), aun cuando su tiempo total de solidificación es mayor en 25%.

Las mazarotas se diseñan de formas distintas. El diseño que se muestra en la figura 10.2*b*) es una ***mazarota lateral***. Se adjunta al lado del fundido por medio de un canal pequeño. Una ***mazarota superior*** es aquella que se conecta a la superficie superior del fundido. Las mazarotas son abiertas o ciegas. Una ***mazarota abierta*** está expuesta al exterior en la superficie superior del marco superior. Esto tiene la desventaja de permitir que escape más calor, lo que favorece la solidificación más rápida. Una ***mazarota ciega*** está cerrada por completo dentro del molde, como se ve en la figura 10.2*b*).

REFERENCIAS

[1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L., ***Manufacturing Processes,*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.

[2] Beeley, P. R., ***Foundry Technology,*** Butterworths-Heinemann, Oxford, Inglaterra, 2001.

[3] Datsko, J., ***Material Properties and Manufacturing Processes,*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1966.

[4] Edwards L. y Endean, M., ***Manufacturing with Materials,*** Open University, Milton Keynes y Butterworth Scientific Ltd., Londres, 1990.

[5] Flinn, R. A., ***Fundamentals of Metal Casting,*** American Foundrymens Society, Inc., Des Plaines, Illinois, 1987.

[6] Heine, R. W., Loper, Jr., C. R. y Rosenthal, C., ***Principles of Metal Casting,*** 2a. ed., McGraw-Hill Book Co. Nueva York, 1967.

[7] Kotzin, E. L. (ed.). ***Metalcasting and Molding Processes,*** American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Illinois, 1981.

[8] Lessiter, M. J. y K. Kirgin, "***Trends in the Casting Industry,***" ***Advanced Materials & Processes,*** enero de 2002, pp. 42-43.

[9] ***Metals Handbook,*** 9a. ed., vol. 15: ***Casting,*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1988.

[10] Mikelonis, P. J. (ed.), ***Foundry Technology,*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982.

[11] Niebel, B. W., Draper, A. B., Wysk, R. A., ***Modern Manufacturing Process Engineering,*** McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1989.

[12] Simpson, B. L., ***History of the Metalcasting Industry,*** American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, 1997.

[13] Taylor, H. F., Flemings, M. C. y Wulff, J., ***Foundry Engineering,*** 2a. ed., American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, 1987.

[14] Wick, C., Blenedict, J. T. y Veilleux, R. F., ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed. Vol. II, ***Forming,*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

10.1. Identifique algunas de las ventajas importantes de los procesos de obtener formas con fundición.

10.2. ¿Cuáles son algunas de las limitaciones y desventajas de la fundición?

10.3. ¿Cómo se llama por lo general a la fábrica que ejecuta operaciones de fundición?

10.4. ¿Cuál es la diferencia entre un molde abierto y uno cerrado?

10.5. Mencione los dos tipos básicos de molde que diferencian a los procesos de fundición.

10.6. ¿Cuál es el proceso de fundición de mayor importancia comercial?

10.7. ¿Cuál es la diferencia entre un modelo y un núcleo, en el moldeo en arena?

10.8. ¿Qué significa el término sobrecalentamiento?

10.9. ¿Por qué debe evitarse el flujo turbulento de un metal fundido en el molde?

10.10. ¿Cuál es la ley de la continuidad según se aplica al flujo de metal derretido en la fundición?

10.11. ¿Cuáles son algunos de los factores que afectan la fluidez de un metal derretido durante el vertido en la cavidad de un molde?

10.12. ¿Qué significa calor de fusión en el contexto de la fundición?

10.13. ¿En qué difiere la solidificación de aleaciones de la solidificación de los metales puros?

10.14. ¿Qué es una aleación eutéctica?

10.15. ¿Cuál es la relación conocida como regla de Chvorinov en la fundición?

10.16. Identifique las tres fuentes de contracción en la fundición de un metal después del vertido.

10.17. ¿Qué es un enfriador en el contexto de la fundición?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 15 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

10.1. ¿En cuál de los tipos siguientes se realiza la fundición en arena?: *a*) molde desechable o *b*) molde permanente.

10.2. De las siguientes denominaciones, ¿cuál es la de la mitad superior de un molde de fundición con arena: *a*) marco superior o *b*) marco inferior?

10.3. En la fundición, ¿cuál de los siguientes es una caja de moldeo?: *a*) botella de bebida de los fundidores, *b*) caja que contiene el marco superior y el inferior, *c*) contenedor de metal líquido o *d*) metal que se extruye entre las mitades del molde.

10.4. En el trabajo de fundición, ¿cuál de los siguientes es un vaciadero?: *a*) canal en el molde que conduce del bebedero a la cavidad principal del molde, *b*) hombre que transporta el metal derretido hacia el molde o *c*) canal vertical por el que el metal fundido se vierte al molde.

10.5. La turbulencia durante el vertido de metal fundido es indeseable, ¿por cuáles de las razones siguientes? (dos razones son las mejores): *a*) ocasiona decoloramiento de la superficie del molde, *b*) disuelve el aglutinante que se emplea para mantener unido el molde de arena, *c*) incrementa la erosión de las superficies del molde, *d*) aumenta la formación de óxidos metálicos que quedan atrapados durante la solidificación, *e*) incrementa el tiempo de llenado del molde y *f*) aumenta el tiempo total de solidificación.

10.6. El tiempo total de solidificación se define ¿como cuál de los siguientes?: *a*) tiempo entre el vertido y la solidificación completa, *b*) tiempo entre el vertido y el enfriamiento a temperatura ambiente, *c*) tiempo entre la solidificación y el enfriamiento a temperatura ambiente o *d*) tiempo para que se disipe el calor de fusión.

10.7. Durante la solidificación de una aleación cuando está presente una mezcla de metales sólido y líquido, ¿la mezcla sólido-líquida se refiere a cuál de las siguientes?: *a*) composición eutéctica, *b*) segregación de lingote, *c*) liquidus, *d*) zona blanda o *e*) solidus.

10.8. La regla de Chvorinov establece que el tiempo total de solidificación es proporcional a cuál de las cantidades siguientes: a) $(A/V)^n$, b) H_f, c) T_m, d) V, e) V/A o *f*) $(V/A)^2$; donde A = área superficial del fundido, H_f = calor de fusión, T_m = temperatura de fusión y V = volumen del fundido.

10.9. En la fundición, una mazarota se describe ¿como cuál de los siguientes? (hay tres respuestas correctas): *a*) inserto en el fundido que inhibe la flotabilidad del núcleo, *b*) sistema de paso en el que el bebedero alimenta directamente a la cavidad, *c*) metal que no es parte del fundido, *d*) fuente de metal derretido que alimenta al fundido y compensa la contracción durante la solidificación y *e*) metal que se desperdicia y que por lo general se recicla.

10.10. En un molde de fundición con arena, la razón *V/A* de la mazarota debe ser: *a*) igual a, *b*) mayor que o *c*) menor que, la razón *V/A* del fundido en sí.

10.11. ¿Cuál de los tipos siguientes de mazarota queda encerrado por completo en el molde de arena y conectado a la cavidad principal por medio de un canal que alimenta el metal fundido? (dos respuestas correctas): *a*) mazarota ciega, *b*) mazarota abierta, *c*) mazarota lateral y *d*) mazarota superior.

PROBLEMAS

Calentamiento y vertido

10.1. Va a fundirse un disco de aluminio puro de 40 cm de diámetro y 5 cm de espesor, en una operación de fundición con molde abierto. La temperatura de fundición del aluminio es de 660 ºC, y durante el vertido es de 800 ºC. Suponga que la cantidad de aluminio por calentar será 5% más que lo que se necesita para llenar la cavidad del molde. Calcule la cantidad de calor que debe agregarse al metal para calentarlo a la temperatura de vertido, si se inicia a la temperatura ambiente de 25 ºC. El calor de fusión del aluminio es de 389.3 J/g. Otras propiedades se pueden obtener de las tablas 4.1 y 4.2 del texto. Suponga que el calor específico tiene el mismo valor para el aluminio sólido y fundido.

10.2. Va a calentarse una cantidad suficiente de cobre puro para fundir una placa grande en un molde abierto. La placa tiene estas dimensiones: largo = 20 in, ancho = 10 in y espesor = 3 in. Calcule la cantidad de calor que debe agregarse al metal

para calentarlo a la temperatura de 2 150 °F para verterlo. Suponga que la cantidad de metal que se va a calentar es 10% más que lo necesario para llenar la cavidad del molde. Las propiedades del metal son: densidad = 0.324 lbm/in^3, punto de fusión = 1 981 ºF, calor específico del metal = 0.093 Btu/lbm-F en estado sólido y 0.090 Btu/lbm-F en estado líquido y calor de fusión = 80 Btu/lbm.

10.3. El bebedero que conduce al vaciadero de cierto molde tiene una longitud de 175 mm. El área de la sección transversal en la base del bebedero es de 400 mm^2. La cavidad del molde tiene un volumen de 0.001 m^3. Determine *a*) la velocidad del metal fundido que fluye a través de la base del bebedero, *b*) el gasto volumétrico y *c*) el tiempo que se requiere para llenar la cavidad del molde.

10.4. Un molde tiene un bebedero con longitud de 6.0 in. El área de la sección transversal en el fondo del bebedero es de 0.5 in^2. El bebedero lleva a un vaciadero horizontal que alimenta la cavidad del molde, cuyo volumen es de 75 in^3. Determine *a*) la velocidad del metal fundido que fluye a través de la base del bebedero, *b*) el gasto volumétrico y *c*) el tiempo que se requiere para llenar la cavidad del molde.

10.5. El gasto del metal líquido en el bebedero de un molde es de 1 litro/s. El área de la sección transversal en la parte superior del bebedero es de 800 mm^2 y su longitud es de 175 mm. ¿Cuál es el área que debe usarse en la base del bebedero para evitar la aspiración de metal fundido?

10.6. El gasto volumétrico de metal fundido hacia el bebedero desde el embudo es de 50 in^3/s. En la parte superior, donde el embudo lleva al bebedero, el área de la sección transversal es de 1.0 in^2. Determine cuál debe ser el área en la parte inferior del bebedero si su longitud es de 8.0 in. Se desea mantener un gasto constante arriba y abajo, a fin de evitar la aspiración del metal líquido.

10.7. Va a verterse metal fundido al embudo de un molde de arena, a una tasa estable de 1 000 cm^3/s. El metal fundido sobrepasa al embudo y fluye hacia el bebedero. La sección transversal del bebedero es redonda, con diámetro superior de 3.4 cm. Si el bebedero mide 25 cm de largo, determine el diámetro apropiado en su base de modo que se mantenga el mismo gasto volumétrico.

10.8. Durante el vertido hacia un molde de arena, el metal fundido se vierte al bebedero con un gasto constante durante el tiempo que toma llenar el molde. Al final del vertido, el bebedero se llena y hay una cantidad despreciable de metal en el embudo. El bebedero mide 6.0 in de largo. El área de la sección transversal en la parte superior es de 0.8 in^2, y en la base es de 0.6 in^2. El área de la sección transversal del vaciadero que lleva al bebedero también es de 0.6 in^2 y tiene 8.0 in de largo antes de llegar a la cavidad de un molde cuyo volumen es de 65 in^3. El volumen de la mazarota que se ubica a lo largo del vaciadero cerca de la cavidad del molde es de 25 in^3. Toma un total de 3.0 s para que se llene todo el molde (incluidos la cavidad, mazarota, vaciadero y bebedero). Esto es más que el tiempo teórico que se requiere, lo que indica una pérdida de velocidad debida a la fricción en el bebedero y el vaciadero. Encuentre *a*) la velocidad teórica y gasto en la base del bebedero, *b*) el volumen total del molde, *c*) la velocidad real y gasto en la base del bebedero y *d*) la pérdida de altura piezométrica en el sistema de paso debido a la fricción.

Contracción

10.9. La cavidad de un molde tiene la forma de un cubo de 100 mm por lado. Determine las dimensiones y volumen del cubo final después de que se enfría a temperatura ambiente, si el metal que se funde es cobre. Suponga que el molde está lleno al principio de la solidificación, y que ocurre una contracción uniforme en todas direcciones. Use los valores de la contracción que se dan en la tabla 10.1.

10.10. La cavidad de un molde para fundición tiene las dimensiones siguientes: L = 250 mm, W = 125 mm, y H = 20 mm. Determine las dimensiones del fundido final después de que se enfría a temperatura ambiente, si el metal que se funde es aluminio. Suponga que al principio de la solidificación el molde se encuentra lleno y que la contracción ocurre de manera uniforme en todas direcciones. Utilice los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.

10.11. Determine la escala de una "regla de contracción" que van a usar los modelistas para el acero al bajo carbono. Exprese su respuesta en términos de fracciones decimales de pulgadas de elongación por pie de longitud, en comparación con una regla estándar. Utilice los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.

10.12. Determine la escala de una "regla de contracción" que se va a emplear por parte de los modelistas para el latón que consiste en 70% de cobre y 30% de zinc. Exprese la respuesta en términos de milímetros de elongación por metro de longitud, comparada con una regla estándar. Use los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.

10.13. Determine la escala de una "regla de contracción" que van a emplear los modelistas para el hierro colado gris. El hierro colado gris tiene una contracción volumétrica de –2.5%, lo que significa que se expande durante la solidificación. Exprese la respuesta en términos de milímetros de elongación por metro de longitud, en comparación con una regla estándar. Emplee los valores de contracción que se proporcionan en la tabla 10.1.

10.14. Las dimensiones finales de un fundido en forma de disco de acero al bajo carbono son: diámetro = 12.0 in, y espesor = 0.75 in. Determine las dimensiones de la cavidad del molde de modo que se tome en cuenta la contracción. Suponga que la contracción ocurre de manera uniforme en todas direcciones. Use los valores de contracción que aparecen en la tabla 10.1.

Tiempo de solidificación y diseño de la mazarota

10.15. En el fundido de acero en ciertas condiciones de molde, por experiencias anteriores se sabe que la constante de éste para la regla de Chvorinov es de 4.0 min/cm^2. El fundido es una placa plana que mide 30 cm de longitud, 10 cm de ancho y 20 mm de espesor. Determine cuánto tiempo tomará para que el molde se solidifique.

10.16. Resuelva para el tiempo de solidificación total del problema anterior, con el uso de un exponente de 1.9 in en lugar de 2.0 en la regla de Chvorinov. ¿Qué ajuste debe hacerse en las unidades de la constante del molde?

10.17. Una parte con forma de disco va a fundirse con aluminio. El diámetro del disco es de 500 mm y su espesor de 20 mm. Si la constante del molde es de 2.0 s/mm^2 en la regla de Chvorinov, ¿cuánto tiempo tomará que el fundido se solidifique?

10.18. En experimentos de fundición llevados a cabo con cierta aleación y tipo de molde de arena, tomó 155 s para que se solidificara un fundido en forma de cubo. El cubo medía 50 mm de lado. *a*) Determine el valor de la constante del molde en la regla de Chvorinov. *b*) Si se utiliza la misma aleación y tipo de molde, encuentre el tiempo total de solidificación para un fundido cilíndrico con diámetro de 30 mm y longitud de 50 mm.

10.19. Un fundido de acero tiene una forma cilíndrica de 4.0 in de diámetro y pesa 20 libras. A este fundido le toma 6.0 minutos solidificarse por completo. Otro fundido de forma cilíndrica con la misma razón de diámetro a longitud pesa 12 libras. Está hecho del mismo acero, y se emplearon las mismas condiciones de molde y contracción. Determine: *a*) la constante del molde en la regla de Chvorinov, *b*) las dimensiones y *c*) el tiempo total de solidificación del fundido más ligero. La densidad del acero es de 490 lb/ft^3.

10.20. Van a compararse los tiempos totales de solidificación de tres formas de fundido: 1) una esfera con diámetro de 10 cm, 2) un cilindro con diámetro de 10 cm y la misma medida de longitud y 3) un cubo con lado de 10 cm. En los tres casos va a emplearse la misma aleación para la fundición. *a*) Determine los tiempos relativos de solidificación para cada forma. *b*) Con base en los resultados del inciso a diga, ¿cuál elemento geométrico sería la mejor mazarota? *c*) Si la constante del molde es de 3.5 min/cm^2 en la regla de Chvorinov, calcule el tiempo total de solidificación para cada fundido.

10.21. Van a compararse los tiempos totales de solidificación de tres formas de fundido: 1) esfera, 2) cilindro, en el que la razón longitud a diámetro es de 1.0 y 3) cubo. Para las tres formas el volumen es de 1 000 cm^3 y va a emplearse la misma aleación para el fundido. *a*) Determine los tiempos relativos de solidificación para cada forma. *b*) Con base en los resultados del inciso a diga, ¿cuál elemento geométrico sería la mazarota mejor? *c*) Si la constante del molde es de 3.5 min/cm^2 en la regla de Chvorinov, calcule el tiempo total de solidificación para cada fundido.

10.22. Va a usarse una mazarota cilíndrica para un molde de fundición con arena. Para un volumen dado de cilindro, determine la razón diámetro a longitud que maximiza el tiempo de solidificación.

10.23. Va a diseñarse una mazarota de forma esférica para un molde de fundición con arena. El fundido es una placa rectangular con longitud de 200 mm, ancho de 100 mm y espesor de 18 mm. Si se sabe que el tiempo total de solidificación del fundido en sí es de 3.5 min, determine el diámetro de la mazarota de modo que a éste le tome 25% más tiempo para solidificarse.

10.24. Se va a diseñar una mazarota cilíndrica para un molde de fundición con arena. La longitud del cilindro va a ser 1.25 veces su diámetro. El fundido es una placa cuadrada con lado de 10 in y espesor de 0.75 in. Si el metal es hierro colado y la constante del molde es de 16.0 min/in^2 en la regla de Chvorinov, determine las dimensiones de la mazarota de modo que le tome 30% más tiempo solidificarse.

10.25. Se diseñará una mazarota cilíndrica con razón diámetro a longitud de 1.0 para un molde de fundición con arena. La forma del fundido se ilustra en la figura P10.25, en la que las unidades son pulgadas. Si la constante del molde es de 19.5 min/in^2 en la regla de Chvorinov, determine las dimensiones de la mazarota de modo que solidificarse le tome 0.5 min más que al fundido en sí.

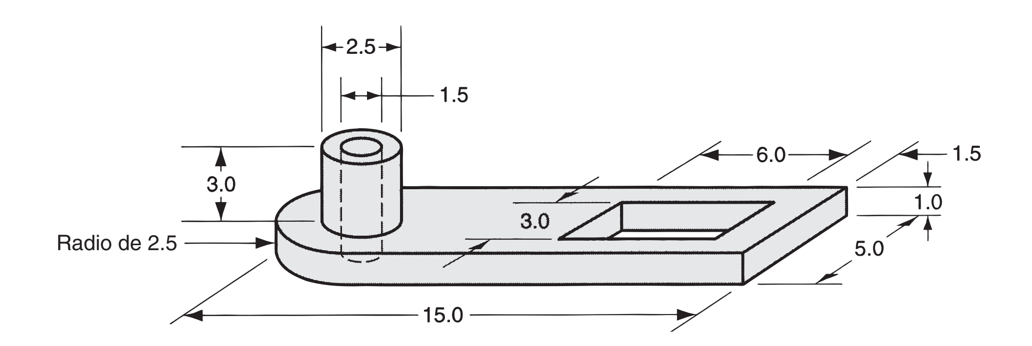


FIGURA P10.25 Forma del fundido para el problema 10.25 (las unidades son in).

11 PROCESOS DE FUNDICIÓN DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías, con base en el tipo de molde: 1) moldes desechables y 2) moldes permanentes. En las operaciones de fundición con un molde desechable, debe sacrificarse éste con objeto de retirar la pieza fundida. Como para cada fundido se requiere un molde nuevo, es frecuente que las tasas de producción con procesos de moldes desechables estén limitadas por el tiempo que se requiere para hacer el molde, más que por el que se necesita para el fundido en sí. Sin embargo, para ciertas formas de las piezas, los moldes de arena pueden producirse y hacerse los fundidos a tasas de 400 piezas por hora y aún más. En los procesos de fundición con moldes permanentes, se fabrica el molde con metal (u otro material duradero) y se emplea muchas veces para elaborar fundidos numerosos. En consecuencia, estos procesos tienen una ventaja natural en términos de tasas de producción.

El estudio de los procesos de fundición está organizado en este capítulo como sigue: 1) fundición en arena, 2) otros procesos de fundición con moldes desechables y 3) procesos de fundición con moldes permanentes. El capítulo también incluye el equipo y prácticas de fundición que se emplean en las fundidoras. Otra sección se ocupa de la inspección y temas de calidad. En la sección final se presentan los lineamientos para el diseño de productos.

11.1 FUNDICIÓN EN ARENA

La fundición con arena es, por mucho, el proceso que se usa con más amplitud, pues es responsable de la mayoría del total del peso de los fundidos. Casi todas las aleaciones de fundición pueden fundirse con arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con temperaturas de fusión elevadas, tales como aceros, níqueles y titanios. Su versatilidad permite la fundición de piezas cuyo tamaño varía de pequeño a muy grande (véase la figura 11.1) y en cantidades de producción que van desde uno a millones.

La ***fundición en arena***, también conocida como ***fundición en molde de arena***, consiste en verter metal derretido en un molde de arena y dejar que se solidifique, para luego romper el molde y retirar el fundido. El fundido debe limpiarse e inspeccionarse, y a veces se requiere darle tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades metalúrgicas. La cavidad del molde de arena se forma por la compresión de arena alrededor de un modelo (un duplicado aproximado de la pieza por fundir), y luego se retira el modelo separando el molde en dos mitades. El molde también contiene el sistema de paso o sistema de vaciado y la mazarota. Además, si el fundido va a tener superficies interiores (por ejemplo, partes huecas o con agujeros), debe incluirse un núcleo en el molde. Como éste se sacrifica para retirar el fundido, debe hacerse un molde nuevo por cada pieza que se produce. De esta descripción breve, se considera que la fundición con arena no sólo es la operación de fun-



FIGURA 11.1 Pieza grande fundida con arena, pesa más de 680 kg (1 500 lb), para la estructura de un compresor de aire. (Cortesía de Elkhart Foundry, fotografía por Paragon Inc., Elkhart, Indiana).

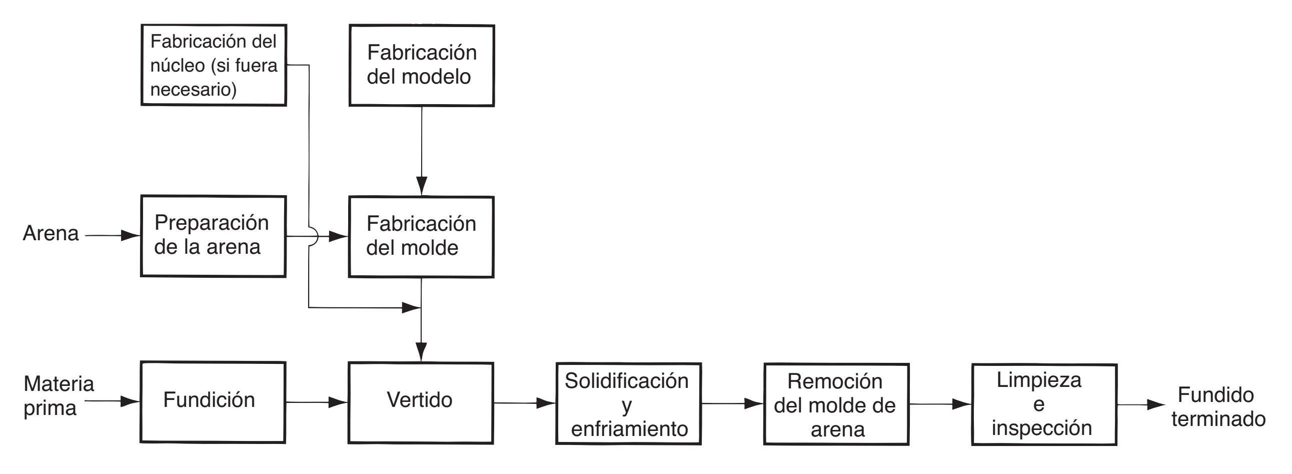


FIGURA 11.2 Secuencia de las etapas de la producción en la fundición con arena. Se incluye no sólo la operación de fundición sino también la fabricación del modelo y la fabricación del molde.

dido en sí, sino también la fabricación del modelo y la fabricación del molde. La secuencia de producción se presenta en la figura 11.2.

En las secciones siguientes el estudio tiene que ver con: modelos, núcleos, moldes y su fabricación, la operación de fundido, y limpieza e inspección.

11.1.1 Modelos y núcleos

La fundición con arena requiere un ***modelo***, es decir, un ”patrón” de tamaño real de la pieza, aunque más grande para que se tome en cuenta las tolerancias por contracción y maquinado en el fundido final. Los materiales que se usan para fabricar modelos incluyen madera, plásticos y metales. La madera es un material común para hacer modelos debido a la facilidad para darle forma. Sus desventajas son que tiende a deformarse y la arena que se compacta alrededor de ella la erosiona, lo que limita el número de veces que puede volver a utilizarse. Los modelos de metal son más caros, pero duran mucho más. Los plásticos representan un acomodo entre la madera y el metal. La selección del material apropiado para el modelo depende mucho de la cantidad total de fundidos por hacer.

Como se ilustra en la figura 11.3, hay varios tipos de modelos. El más simple está hecho de una sola pieza y recibe el nombre de ***modelo sólido***, tiene la misma forma que el fundido y su tamaño está ajustado para la contracción y el maquinado. Aunque es el modelo más fácil de fabricar, no es el más fácil de usar para hacer moldes de arena. La determinación de la ubicación de la línea de separación de las dos mitades del molde de un modelo sólido puede ser un problema, y la incorporación del sistema de paso y la mazarota al molde queda a juicio y habilidad del trabajador que funde. En consecuencia, los modelos sólidos se limitan por lo general a cantidades muy bajas de producción.

Los ***modelos deslizantes*** consisten en dos piezas, que dividen la parte a lo largo de un plano que coincide con la línea divisoria del molde. Los modelos deslizantes son apropiados para piezas con configuraciones geométricas complejas y cantidades moderadas de producción. La línea de división del molde está predeterminada por las dos mitades del modelo, y no se deja al criterio del operador.

Para cantidades de producción mayores se emplean modelos de placas ajustadas o de capucha y base. En los modelos de ***placas ajustadas***, las dos piezas del modelo deslizante están sujetas a los lados opuestos de una placa de madera o metal. Los agujeros en la placa permiten que los marcos superior e inferior (capucha y base) del molde se alineen en

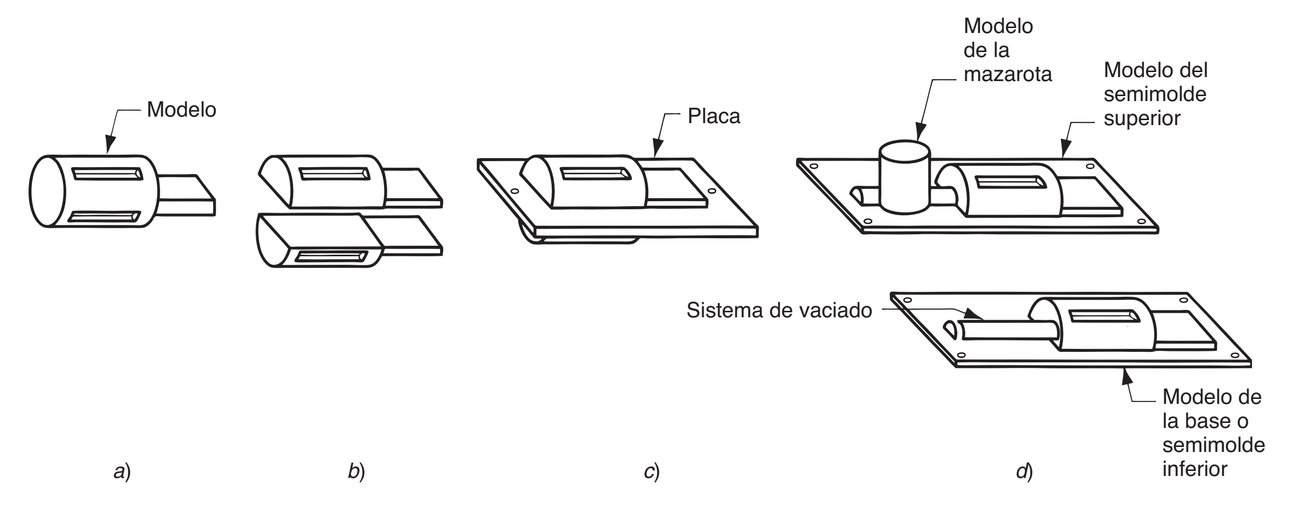
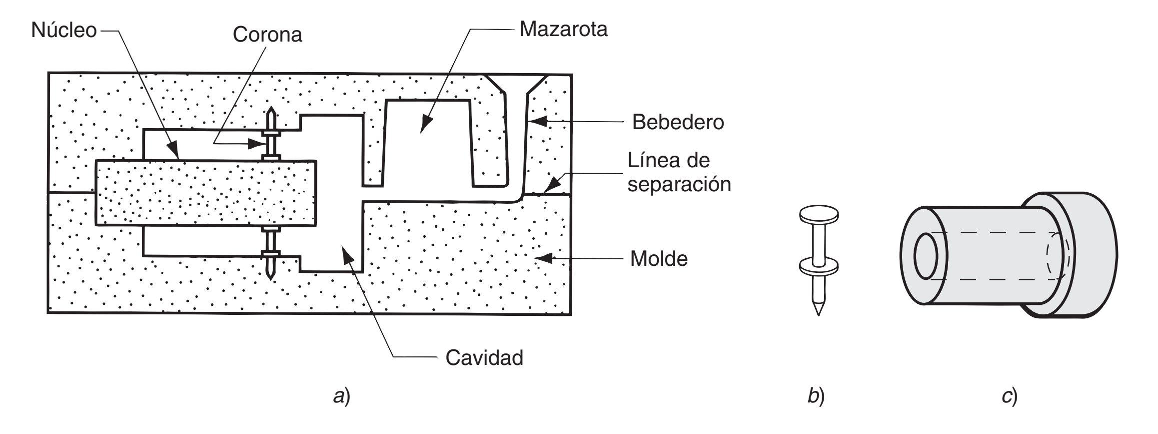


FIGURA 11.3 Tipos de modelos que se emplean en la fundición con moldes de arena: *a*) sólido, *b*) de deslizamiento, *c*) de placas ajustadas y *d*) de capucha y base.

forma adecuada. Los ***modelos de capucha y base*** son similares a los de placas ajustadas, excepto porque las mitades que se separan están ajustadas a placas diferentes, de modo que las secciones de la capucha y base del molde se fabrican de manera independiente en lugar de usar las mismas herramientas para ambas. En el inciso d de la figura se muestra el sistema de paso y mazarota de los modelos de capucha y base.

Los modelos definen la forma externa del vertido de la pieza por fundir. Si el fundido va a tener superficies internas se requiere un núcleo. Un ***núcleo (corazón)*** es un modelo a tamaño real de las superficies interiores de la pieza. Se inserta en la cavidad del molde antes del vertido, de modo que el metal derretido fluirá y se solidificará entre la cavidad del molde y el núcleo, para formar las superficies externa e interna del fundido. Por lo general, el núcleo está hecho de arena, compactada para que tenga la forma que se desea. Igual que el modelo, el tamaño real del núcleo debe incluir tolerancias para la contracción y el maquinado. En función de la forma de la pieza, el núcleo quizá requiera soportes para quedar en posición en la cavidad del molde durante el vertido. Estos soportes, llamados ***coronas***, están hechos de un metal con temperatura de fusión más alta que la del metal que se va a fundir. Por ejemplo, para hacer fundidos de hierro se usarían coronas de acero. En el vertido y solidificación, las coronas se unen en el fundido. En la figura 11.4 se ilustra un arreglo posible de un núcleo en un molde con coronas. La parte de la corona que sobresale del fundido se corta posteriormente.

FIGURA 11.4 *a*) Núcleo mantenido en su sitio dentro de la cavidad del molde por medio de coronas, *b*) diseño posible de las coronas, *c*) fundido con cavidad interna.



11.1.2 Moldes y su fabricación

Las arenas de fundición son sílice (SiO_2) o sílice mezclado con otros minerales. La arena debe tener buenas propiedades refractarias, es decir, capacidad de soportar temperaturas altas sin que se funda o sufra algún otro tipo de degradación. Otras características importantes de la arena son el tamaño del grano, su distribución en la mezcla y la forma de los granos individuales (véase la sección 16.1). Los granos pequeños dan una mejor superficie al terminado de la pieza fundida, pero los de tamaño grande son más permeables (para permitir el escape de los gases durante el vertido). Los moldes elaborados con granos irregulares tienden a ser más fuertes que los hechos con granos redondeados debido a la imbricación, aunque ésta tiende a restringir la permeabilidad.

Al hacer el molde, los granos de arena se mantienen unidos por una mezcla de agua y arcilla adhesiva. Una mezcla común (en volumen) es de 90% de arena, 3% de agua y 7% de arcilla. Para mantener a la arcilla en su sitio se emplean distintos agentes adhesivos, como resinas orgánicas (por ejemplo, resinas fenólicas) y aglutinantes inorgánicos (por ejemplo, silicato de sodio y fosfato). Además de la arena y el aglutinante, en ocasiones se agregan aditivos a la mezcla a fin de mejorar propiedades tales como la resistencia o la permeabilidad del molde.

Para formar la cavidad del molde, el método tradicional consiste en compactar la arena alrededor del modelo para la capucha y base, en un contenedor llamado ***caja de moldeo***. El proceso de compactación se lleva a cabo con métodos diferentes. El más simple es golpear con la mano, lo que lleva a cabo un trabajador de la fundición. Además, se han inventado diversas máquinas para mecanizar el procedimiento de compactación. Éstas operan con distintos mecanismos, entre ellos: 1) comprimir la arena alrededor del modelo por medio de presión neumática, 2) ejecutar una acción de golpeteo en la que la arena, contenida en la caja de moldeo con el modelo, se deja caer repetidas veces a fin de que se comprima en su sitio y 3) realizar una acción de lanzamiento en la que los granos de arena chocan a gran velocidad contra el modelo.

Una alternativa a las cajas tradicionales para cada molde de arena es el ***moldeo sin caja de moldeo***, que se refiere al uso de una caja de moldeo maestra, en un sistema mecanizado de producción de moldes. Cada molde de arena se produce por medio de la misma caja de moldeo maestra. Con este método se afirma que la producción de moldes alcanza los 600 por hora [6].

Para determinar la calidad del molde de arena se emplean diferentes indicadores [5]: 1) ***resistencia***, capacidad del molde para conservar su forma y resistir la erosión ocasionada por el flujo de un metal fundido; depende de la forma del grano, cualidades adhesivas del aglutinante, y otros factores; 2) ***permeabilidad***, capacidad del molde para permitir que pasen el aire y los gases calientes a través de los vacíos de la arena, durante la operación de fundido; 3) ***estabilidad térmica***, característica de la arena en su superficie de la cavidad del molde para resistir el agrietamiento y la deformación ante el contacto con el metal fundido; 4) ***colapsabilidad***, facilidad de que el molde se retire y permita que el fundido se contraiga sin que se agriete; también se refiere a la facilidad con que se quita la arena del fundido durante su limpieza, y 5) ***reutilización***, ¿es posible reutilizar la arena del molde roto para hacer otros moldes? En ocasiones, estas medidas son incompatibles: por ejemplo, un molde con mucha resistencia es menos colapsable.

Con frecuencia, los moldes de arena se clasifican como de arena verde, arena seca o de superficie seca. Los ***moldes de arena verde*** están elaborados con una mezcla de arena, arcilla y agua; la palabra ***verde*** se refiere al hecho de que el molde contiene humedad en el momento del vertido. Los moldes de arena verde tienen resistencia suficiente para la mayoría de aplicaciones, buenas colapsabilidad, permeabilidad y posibilidades de reuso, y son los menos caros de todos los moldes. Son el tipo de molde que más se emplea, pero no carecen de problemas. La humedad de la arena ocasiona defectos a ciertos fundidos, lo que depende del metal y forma de la pieza. Un ***molde de arena seca*** está hecho con aglutinantes orgánicos en lugar de arcilla, y se cuece en un horno grande a temperaturas

que van de 200 ºC a 320 ºC (400 ºF a 600 ºF) [6]. El horneado da resistencia al molde y endurece la superficie de la cavidad. Los moldes de arena seca proporcionan mejor control dimensional del producto fundido, en comparación con los de arena verde. Sin embargo, es más caro hacer moldes de arena seca, y la tasa de producción disminuye debido al tiempo de secado. Las aplicaciones se limitan por lo general a fundidos medios y grandes con tasas de producción pequeñas o medianas. Con un ***molde de superficie seca***, se obtienen las ventajas de los de arena seca secando la superficie de un molde de arena verde hasta una profundidad de 10 a 25 mm (0.4 a 1 in) de la cavidad del molde, mediante sopletes, lámparas de calor u otros medios. Para dar resistencia a la superficie de la cavidad debe agregarse a la mezcla de arena materiales adhesivos especiales.

Las clasificaciones anteriores de los moldes se refieren al uso de aglutinantes convencionales que consisten en arcilla y agua o aquellos que requieren curado con calor. Además de estas clasificaciones, se han creado moldes aglutinados en forma química que no se basan en ninguno de los ingredientes de unión tradicionales. Algunos de los materiales aglutinantes que se emplean en estos sistemas "sin horno" incluyen resinas de furanos (que consisten en alcohol, urea y formaldehído), fenoles y aceites alquidálicos. Los moldes sin horno se usan cada vez más debido a su buen control dimensional y aplicaciones de alta producción.

11.1.3 La operación de fundición

Después de colocar en posición el núcleo (si lo hay) y de que las dos mitades del molde se hacen embonar, se procede a hacer la fundición. Ésta consiste en el vertido, solidificación y enfriamiento de la pieza fundida (véanse las secciones 10.2 y 10.3). El sistema de paso y la mazarota del molde deben diseñarse para llevar metal líquido a la cavidad y proporcionarle almacenamiento suficiente durante la contracción por solidificación. Debe permitirse que escapen el aire y los gases.

Uno de los peligros durante el vertido es que la flotación inducida por el metal fundido desplace al núcleo. La flotación resulta, según el principio de Arquímedes, del peso del metal fundido que desplaza el núcleo. Dicha fuerza tiende a elevar el núcleo y es igual al peso del líquido desplazado menos el peso del núcleo en sí. En forma de ecuación se expresa así:

$$F_b = W_m - W_c \tag{11.1}$$

donde F_b = fuerza de flotación, N (lb); W_m = peso del metal fundido desplazado, N (lb) y W_c = peso del núcleo, N (lb). Los pesos se determinan como el volumen del núcleo multiplicado por las densidades respectivas del material que lo constituye (arena, por lo común) y del metal por fundir. La densidad de un núcleo de arena es de aproximadamente 1.6 g/cm^3 (0.058 lb/in^3). En la tabla 1.1 se dan las densidades de varias aleaciones de fundición comunes.

TABLA 11.1 Densidades de aleaciones de fundición seleccionadas.

Material	Densidad		Material	Densidad	
	g/cm^3	lb/in^3		g/cm^3	lb/in^3
Aluminio (con pureza de 99%)	2.70	0.098	Hierro colado, gris[a]	7.16	0.260
Aleación de aluminio-silicio	2.65	0.096	Cobre (con pureza de 99%)	8.73	0.317
Aluminio-cobre (92% de aluminio)	2.81	0.102	Plomo (puro)	11.30	0.410
Latón[a]	8.62	0.313	Acero	7.82	0.284

Fuente: [5].

[a] La densidad depende de la composición de la aleación; los valores que se dan son los más comunes.

Ejemplo 11.1 La flotación en el moldeo con arena

Un núcleo de arena tiene un volumen de 1 875 cm^3 y se localiza dentro de la cavidad de un molde de arena. Determine la fuerza de flotación que tiende a elevar el núcleo durante el vertido de plomo dentro del molde.

Solución: La densidad del núcleo de arena es de 1.6 g/cm^3. El peso del núcleo es de 1 875(1.6) = 3 000 g = 3.0 kg. Con base en la tabla 11.1, la densidad del plomo es de 11.3 g/cm^3. El peso del plomo que desplaza el núcleo es de 1 875(11.3) = 21, 188 g = 21.19 kg. La diferencia es de 21.19 – 3.0 = 18.19 kg. Dado que 1 kg = 9.81 N, la fuerza de flotación es F_b = 9.81(18.19) = **178.4 N**.

Después de la solidificación y enfriamiento, se rompe el molde de arena que contiene al fundido para retirar éste. Luego, se limpia la pieza, el sistema de paso y ls mazarota se separan y se quita la arena. Después, se inspecciona el fundido (véase la sección 11.5).

11.2 OTROS PROCESOS DE FUNDICIÓN CON MOLDES DESECHABLES

No obstante que la fundición con arena es tan versátil, existen otros procesos de fundición creados para satisfacer necesidades especiales. Las diferencias entre dichos métodos estriban en la composición del material del molde o la manera en que se le fabrica, o bien en la forma en que se hace el modelo.

11.2.1 Moldeo en cascarón o concha

El ***moldeo en cascarón o concha*** es un proceso de fundición en el que el molde es un cascarón delgado (es común que mida 9 mm o 3/8 de in) hecho de arena y que se mantiene cohesionado por medio de un aglutinante de resina termofija. Se inventó en Alemania a principios de la década de 1940 y el proceso se describe e ilustra en la figura 11.5.

El proceso de moldeo en cascarón tiene muchas ventajas. La superficie de la cavidad de un molde en cascarón es más suave que la del molde convencional de arena verde, y esta suavidad permite un flujo más fácil durante el vertido del metal líquido y un acabado mejor de la superficie del fundido final. Es posible obtener acabados de 2.5 μm (100 μ-in). También se alcanza una exactitud dimensional buena, con tolerancias posibles de ±0.25 mm (±0.010 in) en piezas de tamaño pequeño a medio. Es frecuente que el acabado y exactitud buenos excluyan la necesidad de maquinado adicional. La colapsabilidad del molde por lo general es suficiente para evitar la rugosidad y agrietamiento del fundido.

Las desventajas del moldeo en cascarón incluyen un modelo de metal más caro que el correspondiente al moldeo con arena verde. Esto hace que el moldeo con concha sea difícil de justificar para cantidades pequeñas de piezas, pero puede mecanizarse para la producción masiva y es muy económico para cantidades grandes. Parece apropiado en especial para fundidos de acero de menos de 20 libras. Algunos ejemplos de piezas fabricadas con el empleo de moldeo con concha incluyen engranajes, cuerpos de válvulas, boquillas y árboles de levas.

11.2.2 Moldeo al vacío

El ***moldeo al vacío***, también llamado ***proceso V***, se inventó en Japón alrededor de 1970. Utiliza un molde de arena que se mantiene unido por medio de una presión de vacío en lugar de emplear un aglutinante químico. En consecuencia, el término ***vacío*** se refiere, en el contexto de este proceso, a la fabricación del molde en lugar de a la operación de fundido en sí. En la figura 11.6 se explican las etapas del proceso.

Una de las varias ventajas del moldeo al vacío es la recuperación de arena, debido a que no se emplean aglutinantes. Asimismo, la arena no requiere el reacondicionamiento

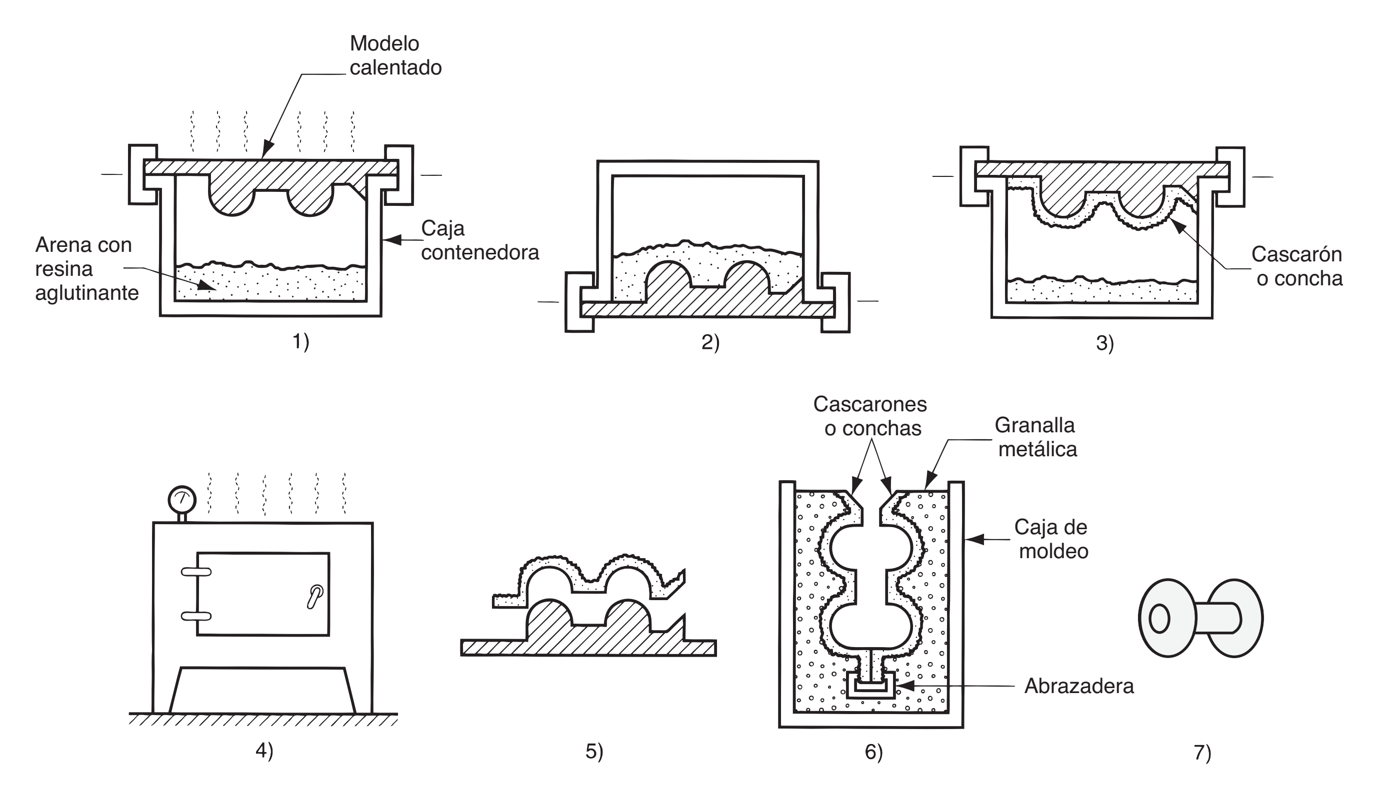


FIGURA 11.5 Etapas del moldeo en cascarón: 1) se calienta una placa de ajuste o de capucha y base, y se coloca sobre una caja que contiene arena mezclada con alguna resina termofija; 2) se invierte la caja de modo que la arena y la resina caigan sobre el modelo caliente, lo que ocasiona que una capa de la mezcla se cure parcialmente sobre la superficie y forme una concha dura; 3) la caja vuelve a su posición original de modo que caigan las partículas sueltas que no resultaron curadas; 4) el cascarón de arena se calienta en un horno durante varios minutos, a fin de completar el curado; 5) el molde en cascarón se separa del modelo; 6) se ensamblan dos mitades del molde en cascarón, apoyadas en dosis de arena o metal en el interior de una caja; y se realiza el vertido. Se retira el fundido terminado, con el bebedero removido, como se aprecia en el 7) de la figura.

mecánico intenso que es normal hacer cuando se emplean aglutinantes para la arena. Como no se mezcla agua con la arena, el producto no tiene los defectos relacionados con la humedad. Las desventajas del proceso V son que es relativamente lento y que no se adapta con facilidad a la mecanización.

11.2.3 Procesos de poliestireno expandido

El ***proceso de fundición con poliestireno expandido*** usa un molde de arena compactada alrededor de un modelo de espuma de poliuretano que se vaporiza cuando el metal fundido se vierte en el molde. El proceso y sus variaciones se conocen también con otros nombres, tales como ***proceso de espuma perdida***, ***proceso de patrón perdido***, ***proceso de evaporación de espuma*** y ***proceso de molde lleno*** (este último es una marca registrada). El modelo de poliestireno incluye la mazarota, vertedores y sistema de paso, y también contiene núcleos internos (de ser necesarios), lo que elimina la necesidad de contar con un núcleo por separado en el molde. Asimismo, dado que el modelo de espuma en sí se convierte en la cavidad en el molde, se puede ignorar otras consideraciones sobre las líneas de separación y dibujo. El molde no tiene que estar abierto en las secciones de capucha y base. En la figura 11.7 se ilustra y describe la secuencia de este proceso de fundición. Se usan diferentes métodos para hacer el modelo, en función de la cantidad de fundidos por producir. Para fundidos de una sola clase, la espuma se corta en forma manual de rollos grandes y se ensambla para formar el modelo. Para corridas grandes de producción, se

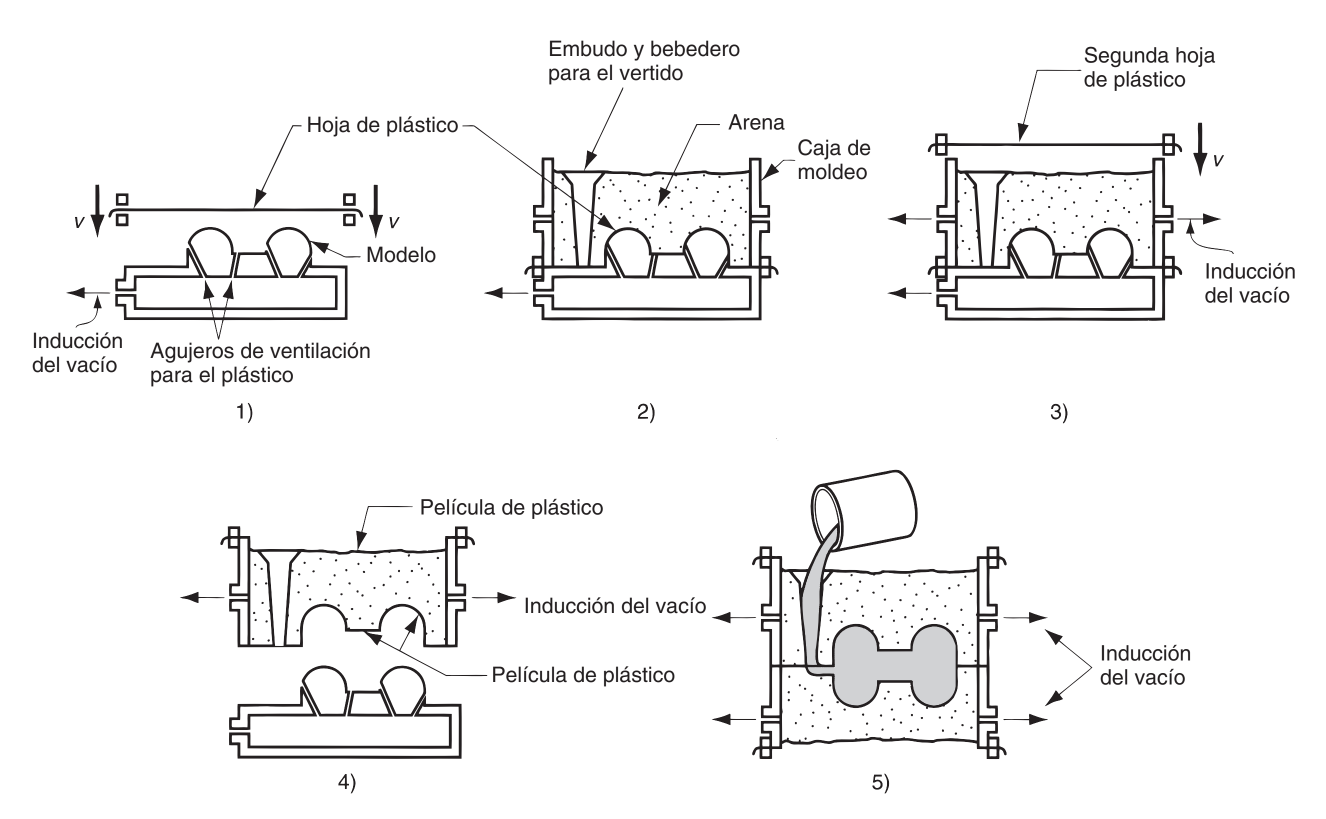


FIGURA 11.6 Etapas del moldeo al vacío: 1) Se precalienta una película delgada de plástico y se coloca sobre una placa de ensamble o modelo de capucha y base por medio de vacío; el modelo tiene agujeros de ventilación pequeños para facilitar la formación del vacío; 2) sobre la placa del modelo se coloca una caja de moldeo de diseño especial y se llena con arena, en la que se forma un bebedero y embudo de vertido; 3) sobre la caja de moldeo se pone otra película de plástico delgada y se induce un vacío que hace que los granos de arena permanezcan unidos, lo que forma un molde rígido; 4) el vacío sobre el modelo del molde se libera para permitir que éste salga del molde; 5) este molde se ensambla con su mitad correspondiente para formar la capucha y base, y manteniendo el vacío sobre ambas mitades se hace el vertido. La película de plástico se quema con rapidez al contacto del metal fundido. Después de la solidificación, se recupera casi toda la arena para volver a emplearla.

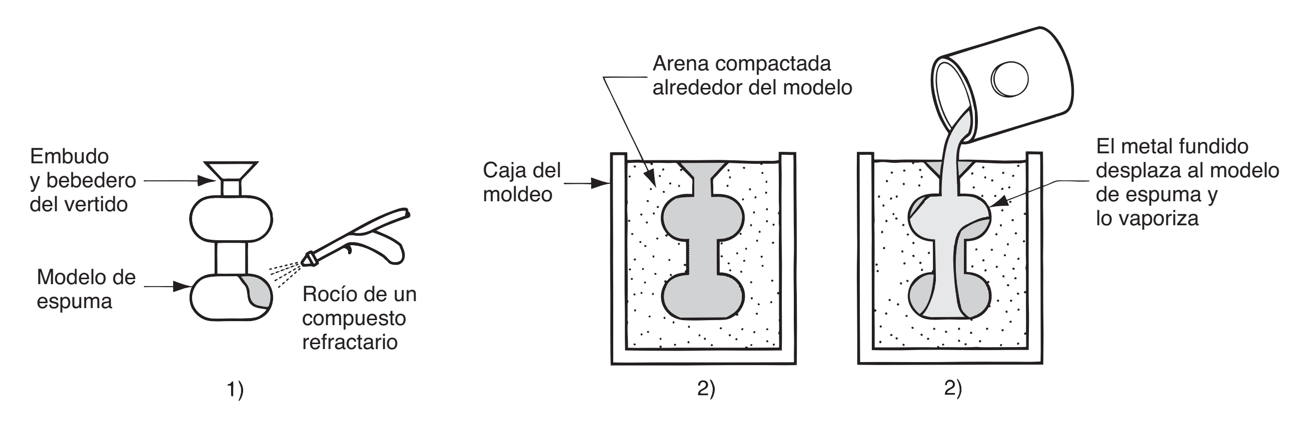


FIGURA 11.7 Proceso de fundición con poliestireno expandido: 1) el modelo de poliestireno se recubre con un compuesto refractario; 2) el modelo de espuma se coloca en la caja del molde, y alrededor de él se compacta arena; 3) se vierte metal fundido en la porción del patrón que constituye el embudo y el bebedero del vertido. Conforme el metal ingresa al molde, la espuma de poliestireno se vaporiza al contacto con el líquido, lo que permite que se llene la cavidad del molde.

prepara una operación de moldeo automatizada para moldear los modelos antes de fabricar los moldes para la fundición. Normalmente, éste se recubre con un compuesto refractario que proporciona una superficie más suave sobre él y para mejorar su resistencia a la alta temperatura. Por lo general, los moldes de arena incluyen agentes de unión. Sin embargo, en ciertos procesos de este grupo se emplea arena seca, lo que ayuda al recubrimiento y reuso.

Una ventaja significativa de este proceso es que el modelo no necesita retirarse del molde. Esto simplifica y agiliza la fabricación de éste. En un molde convencional de arena verde, se requiere de dos mitades con líneas de separación apropiadas, se debe proveer de tolerancias en el diseño del molde, los núcleos deben insertarse y debe agregarse el sistema de paso y mazarota. Con el proceso de poliestireno expandido, estas etapas se incluyen en el modelo mismo. La desventaja del proceso es que se necesita un modelo nuevo para cada fundición. La justificación económica del proceso de poliestireno expandido depende mucho del costo de producción de los modelos. El proceso de fundido con poliestireno expandido se ha aplicado para producir en masa fundiciones para motores de automóviles. A fin de moldear los modelos de espuma de poliestireno para estas aplicaciones, se instalan sistemas de producción automatizada.

11.2.4 Fundición por revestimiento

En la ***fundición por revestimiento***, se elabora un modelo de cera y se recubre con un material refractario para formar el molde, después de lo cual se derrite la cera antes de verter el metal fundido. El término ***revestimiento*** proviene de una de las definiciones menos familiares de la palabra ***revestir***, que es "cubrir por completo", lo que se refiere al recubrimiento del material refractario alrededor del modelo de cera. Es un proceso de precisión para fundir, debido a que es capaz de generar fundidos de gran exactitud y detalles intrincados. El proceso se remonta al antiguo Egipto (véase la nota histórica 11.1) y también se le conoce como ***proceso de la cera perdida***, debido a que el modelo de ese material se pierde en el molde antes de la fundición.

En la figura 11.8 se describen las etapas de la fundición por revestimiento. Como el modelo de cera se derrite después de hacer el molde refractario, debe elaborarse un

Nota histórica 11.1 *Fundición por revestimiento*

El proceso de fundición por cera perdida fue creado por los antiguos egipcios hace 3 500 años. Aunque los registros escritos no identifican cuándo ocurrió el invento o el artesano que lo hizo, los historiadores especulan que el proceso resultó de la asociación cercana entre la cerámica y el moldeo en tiempos remotos. Fue el ceramista quien elaboró los moldes que se usaban para fundir. La idea del proceso de la cera perdida debe haberse originado con un ceramista que estaba familiarizado con el proceso de fundición. Un día, mientras trabajaba en una pieza de cerámica, quizá un vaso o tazón ornamental, se le ocurrió que el artículo debería ser más atractivo y durable si se hiciera de metal, por lo que elaboró un núcleo con la forma general de la pieza, pero más pequeño que las dimensiones finales que deseaba, y lo recubrió con cera para establecer el tamaño. La cera proporcionó un material fácil de conformar, y los artesanos fueron capaces de crear diseños y formas intrincados. Sobre la superficie de la cera, empastó con cuidado varias capas de arcilla y vislumbró un medio de mantener unidos los componentes resultantes. Después, horneó el molde, de modo que la arcilla se endureció y la cera se fundió y drenó para formar una cavidad. Al fin, vertió bronce derretido en ésta y, después de que el fundido se hubiera solidificado y enfriado, rompió el molde para recuperar la pieza. Si se considera la educación y experiencia de este fabricante ancestral de vasijas y las herramientas que tenía para trabajar, el desarrollo del proceso de la fundición con cera perdida demostró gran innovación y percepción. "Los arqueólogos no podrían mencionar ningún otro proceso tan pleno de deducción, capacidad de ingeniería e ingenio" [1].

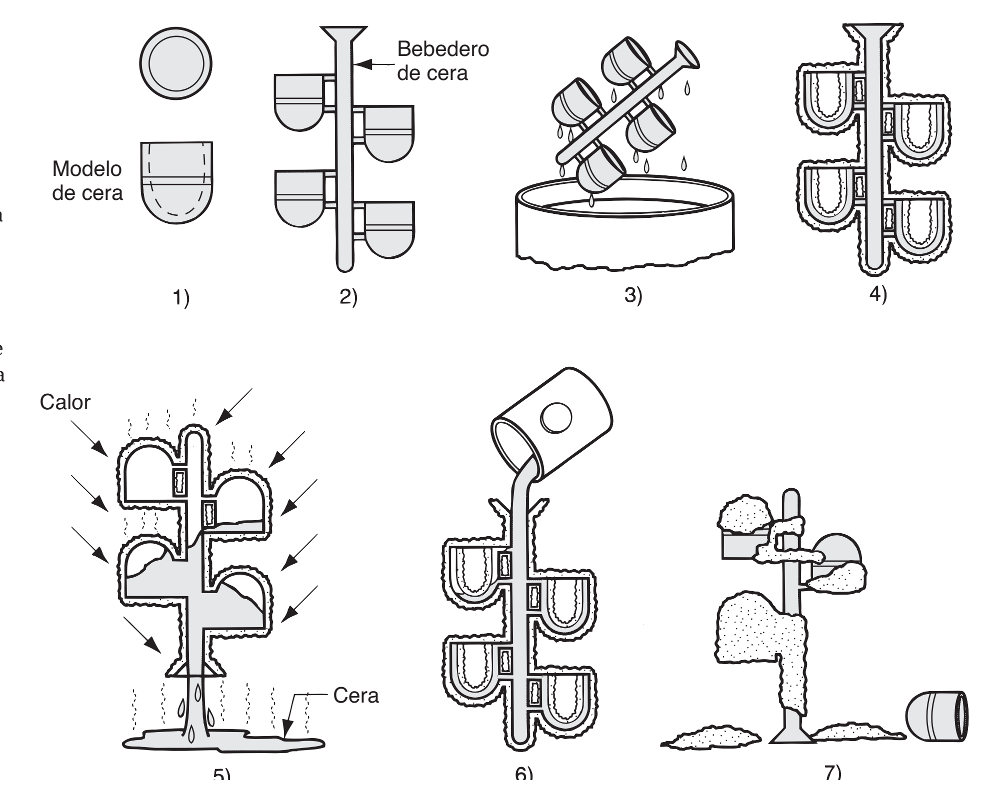


FIGURA 11.8 Etapas de la fundición por revestimiento: 1) se producen los modelos de cera; 2) se unen varios modelos a un bebedero para formar un árbol con ellos; 3) el árbol de modelos se recubre con una capa delgada de material refractario; 4) se forma el molde con el árbol recubierto con material refractario suficiente para volverlo rígido; 5) se mantiene el molde en posición invertida y se calienta para fundir la cera y permitir que salga de la cavidad; 6) el molde se precalienta a temperatura elevada, lo que garantiza que todos los contaminantes del molde se eliminen; eso también permite que el metal líquido fluya con más facilidad dentro de la cavidad detallada; se vierte el metal fundido; se solidifica; y 7) se rompe el molde del fundido terminado. Se separan las partes del bebedero.

modelo separado por cada fundido. La producción de modelos por lo general se lleva a cabo por medio de una operación de moldeo, vertiendo o inyectando la cera caliente en un ***troquel maestro*** diseñado con tolerancias apropiadas para permitir la contracción tanto de la cera como del fundido metálico subsecuente. En los casos en que la forma de la pieza es complicada, pueden unirse varias piezas separadas de cera para formar el modelo. En operaciones de producción grande, se unen varios modelos a un bebedero, también hecho de cera, para formar un ***árbol de modelos***; ésta es la configuración geométrica que se fundirá con el metal.

El recubrimiento con material refractario (etapa 3) por lo general se lleva a cabo con la inmersión del árbol de modelos en una masa muy fina de sílice granular u otro refractario (casi en polvo) mezclado con la pasta para unir el molde a la forma. El grano pequeño del material refractario proporciona una superficie suave y captura los detalles intrincados del modelo de cera. El molde final (etapa 4) se lleva a cabo sumergiendo el árbol repetidas veces en la masa refractaria o compactando con suavidad el material refractario alrededor del árbol en un contenedor. Se deja secar el molde alrededor de ocho horas para endurecer el aglutinante.

Las ventajas de la fundición por revestimiento incluyen las siguientes: 1) es posible fundir piezas de gran complejidad y detalle, 2) se puede tener mucho control dimensional, tolerancias de ±0.075 mm (±0.003 in), 3) se tiene un acabado bueno de la superficie, 4) por lo general se puede recuperar la cera para volver a emplearla y 5) normalmente no se requiere maquinado adicional; éste es un proceso de forma neta. Debido a que en esta operación de fundido están involucradas muchas etapas, es un proceso relativamente caro. Lo normal es que las piezas elaboradas por medio de fundición por revestimiento sean pequeñas, aunque se ha llegado a fundir con éxito piezas con formas complejas que pesan hasta 75 libras. Todos los tipos de metales, incluidos aceros, aceros inoxidables y otras



FIGURA 11.9 Estator de una pieza para un compresor, con 108 aletas aerodinámicas separadas, elaborado por medio de fundición por revestimiento (cortesía de Howmet Corp.).

aleaciones de temperatura alta, son susceptibles de usarse en la fundición por revestimiento. Algunos ejemplos de piezas incluyen elementos complejos de maquinaria, aspas y otros componentes de motores de turbina, joyería y piezas dentales. En la figura 11.9 se ilustra una pieza que muestra las características intrincadas que son posibles con la fundición por revestimiento.

11.2.5 Fundición con moldes de yeso y de cerámica

La ***fundición con molde de yeso*** es similar a aquella con arena, excepto que el molde está hecho de yeso de París ($CaSO_4$–$2H_2O$), en vez de arena. Con el yeso se mezclan aditivos tales como el talco y polvo de sílice para controlar la contracción y el tiempo de preparación, reducir el agrietamiento y aumentar la resistencia. Para hacer el molde, se vierte la mezcla de yeso y agua sobre un modelo de plástico o metal en un recipiente y se deja reposar. Por lo general los modelos de madera son insatisfactorios debido al contacto largo con el agua del yeso. La consistencia del fluido permite que la mezcla de yeso fluya con facilidad alrededor del modelo y capture sus detalles y acabado de la superficie. Así, el producto que se funde en moldes de yeso es notable por tener dichos atributos.

Una de las desventajas del proceso es la cura del molde de yeso, al menos en producción elevada. El molde debe permanecer en reposo alrededor de 20 minutos antes de que el modelo se desmonte. Después, el molde se hornea durante varias horas a fin de eliminar la humedad. Aun con el horneo, no todo el contenido de humedad llega a eliminarse. El dilema que enfrentan los fundidores es que la resistencia del molde se pierde cuando la

pasta se deshidrata demasiado, por lo que el contenido de humedad ocasiona defectos en la fundición del producto. Debe llegarse a un balance entre estas alternativas indeseables. Otra desventaja con el molde de yeso es que no es permeable, lo que limita el escape de los gases de la cavidad del molde. Este problema se puede resolver de distintos modos: 1) con la evacuación del aire de la cavidad del molde antes del vertido 2) por medio del oreo de la masa de yeso antes de fabricar el molde, de modo que la pasta dura que resulte contenga vacíos dispersados finamente y 3) con el uso de una composición especial del molde y el tratamiento conocido como ***proceso de Antioquia***. Éste consiste en usar 50% de arena mezclada con el yeso, calentar el molde en un autoclave (horno que utiliza vapor supercaliente y a presión) y después dejar que se seque. El molde que resulta tiene una permeabilidad considerablemente mayor que la de uno de yeso convencional.

Los moldes de yeso no resisten temperaturas tan altas como las de los moldes de arena. Por tanto, están limitados a la fundición de aleaciones con puntos de fusión bajos, como las de aluminio, magnesio y algunas con base de cobre. Las aplicaciones incluyen moldes de metal para moldear caucho y plástico, impulsores de turbinas y bombas, y otras piezas de forma relativamente intrincada. Los tamaños de los fundidos van de alrededor de 20 g (menos de 1 onza) a más de 100 kg (más de 200 libras). Las más comunes son las piezas que pesan 10 kg (20 libras), aproximadamente. Las ventajas de los moldes de yeso para estas aplicaciones son el buen terminado de la superficie, la exactitud dimensional y la capacidad de fabricar fundidos de sección transversal delgada.

El ***fundido con moldes cerámicos*** es similar al fundido con aquéllos de yeso, excepto que el molde se elabora con materiales cerámicos refractarios que resisten temperaturas más elevadas que los de yeso. Así, los moldes cerámicos se emplean para fundir aceros, hierro y otras aleaciones de alta temperatura. Sus aplicaciones (moldes y piezas relativamente intrincadas) son similares a las de las fundiciones hechas en moldes de yeso, excepto para la fundición de metales. Sus ventajas (exactitud y terminado buenos) también son parecidas.

11.3 PROCESOS DE FUNDICIÓN CON MOLDES PERMANENTES

La desventaja económica de cualquiera de los procesos con molde desechable es que se requiere uno nuevo para cada fundido. En la fundición con molde permanente, el molde se reutiliza muchas veces. En esta sección se trata la fundición con moldes permanentes como el proceso básico del grupo de procesos de fundido que emplean moldes de metal susceptibles de volver a emplearse; otros procesos del grupo son la fundición a troquel y la fundición centrífuga.

11.3.1 El proceso básico con moldes permanentes

La ***fundición con moldes permanentes*** usa un molde de metal construido con dos secciones diseñadas para tener facilidad de apertura y cierre. Es común que estos moldes estén hechos de acero o hierro fundido. La cavidad, con el sistema de paso incluido, se maquina en las dos mitades para proporcionar dimensiones exactas y buen acabado de la superficie. Los metales que es común fundir en moldes permanentes son aluminio, magnesio, aleaciones a base de cobre y hierro colado. Sin embargo, el hierro colado requiere una temperatura de vertido elevada, de 1 250 ºC a 1 500 °C (2 300 ºF a 2 700 ºF), que tiene un efecto grande en la vida del molde. Las temperaturas de vertido muy altas del acero hacen que los moldes permanentes no sean apropiados para este metal, a menos que el molde se fabrique con material refractario.

Es posible usar núcleos en los moldes permanentes a fin de formar superficies internas en el producto fundido. Los núcleos están hechos de metal, pero su forma debe permitir la

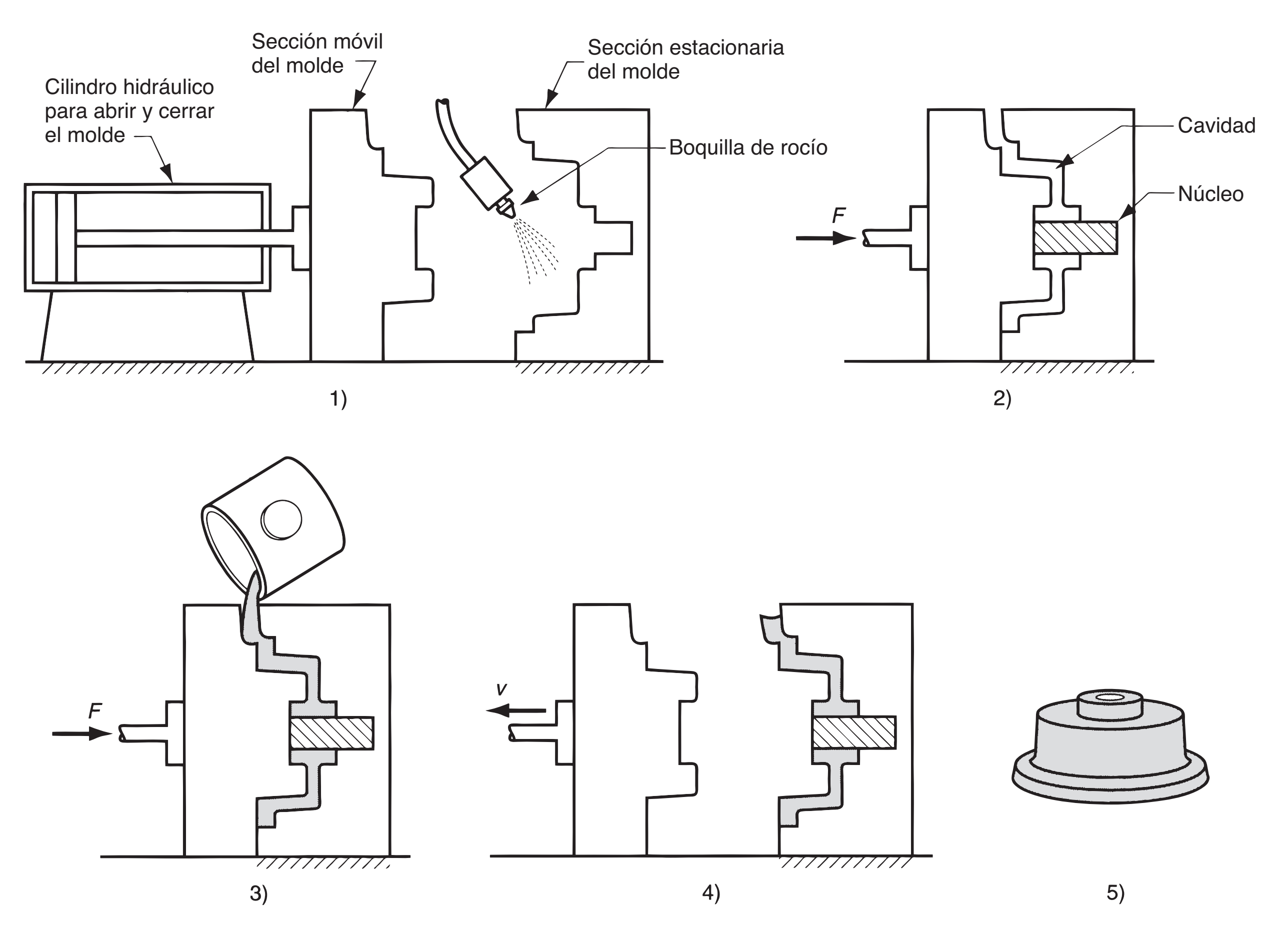


FIGURA 11.10 Etapas del fundido con moldes permanentes: 1) se precalienta y recubre el molde, 2) se insertan los núcleos (si los hay) y se cierra el molde, 3) se vierte metal derretido en el molde y 4) se abre el molde. La pieza terminada se presenta en 5).

remoción del fundido o bien deben colapsarse en forma mecánica para lograr ese cometido. Si el retiro del núcleo de metal es difícil o imposible, hay que usar moldes de arena, caso en el que es frecuente referirse al proceso como ***fundición con molde semipermanente***.

En la figura 11.10 se describe el proceso básico de fundición con moldes permanentes. En la preparación del fundido, primero se precalienta el molde y se rocían uno o más recubrimientos sobre la cavidad. El precalentamiento facilita que el metal fluya a través del sistema de paso y hacia la cavidad. Los recubrimientos ayudan a disipar el calor y lubrican las superficies del molde para que sea más fácil la separación del producto fundido. Después del vertido, tan pronto como se solidifica el metal, se abre el molde y se retira el fundido. A diferencia de los moldes desechables, los permanentes no se colapsan, por lo que deben abrirse antes de que ocurra una contracción apreciable por el enfriamiento a fin de impedir la formación de grietas en el fundido.

Las ventajas de la fundición con moldes permanentes incluyen buen acabado de la superficie y control dimensional estrecho, como ya se dijo. Además, la solidificación más rápida ocasionada por el molde metálico da como resultado una estructura de grano más fina, por lo que se producen fundidos más fuertes. El proceso se limita por lo general a metales con puntos de fusión bajos. Otras limitaciones son que las formas de las piezas son más sencillas, en comparación con las de la fundición con arena (debido a la necesidad de abrir el molde), y lo caro del molde. Debido a que el costo del molde es elevado, el proceso se adapta mejor a una producción elevada y se puede automatizar en consecuencia. Los productos comunes incluyen pistones de automóviles, cuerpos de bombas y ciertos fundidos para aeronaves y mísiles.

11.3.2 Variaciones de la fundición con moldes permanentes

Varios procesos de fundición son muy parecidos al método básico con molde permanente. Éstos incluyen la fundición con molde permanente en hueco, a baja presión y al vacío.

Fundición en hueco La ***fundición en hueco*** es un proceso con molde permanente en el que un fundido hueco se forma por medio de la inversión del molde después de la solidificación parcial de la superficie a fin de drenar el metal líquido del centro. La solidificación comienza en las paredes del molde porque están relativamente frías, y con el paso del tiempo avanza hacia la mitad del fundido (véase la sección 10.3.1). El espesor del cascarón o concha se controla por el tiempo que se permite transcurra antes del drenado. La fundición en hueco se emplea para hacer estatuas, pedestales de lámparas y juguetes, con metales de punto de fusión bajo, tales como plomo, zinc y estaño. En esos artículos es importante la apariencia exterior, pero la resistencia y la forma interior del fundido son consideraciones menores.

Fundición a baja presión En el proceso básico de molde permanente y en la fundición en hueco, el flujo del metal hacia la cavidad del molde está ocasionado por la gravedad. En la ***fundición a baja presión*** el metal líquido se fuerza a pasar a la cavidad sujeto a baja presión, aproximadamente 0.1 MPa (15 lb/in^2), desde abajo, de modo que el flujo es hacia arriba, como se ilustra en la figura 11.11. La ventaja de este enfoque sobre el vertido tradicional es que al molde se introduce metal derretido limpio desde el centro del recipiente, en vez de metal que ya se haya expuesto al aire. De ese modo se minimizan los defectos de porosidad por gas y oxidación, y mejoran las propiedades mecánicas.

Fundición al vacío con molde permanente La ***fundición al vacío con molde permanente*** (no confundir con el molde al vacío, véase la sección 11.2.2) es una variación de aquélla a baja presión, en la cual se emplea un vacío para impulsar el metal derretido hacia la cavidad del molde. La configuración general del proceso de fundición al vacío con molde permanente es similar a la de la operación de fundición a baja presión. La diferencia está en que se utiliza la presión reducida del aire desde el vacío del molde para llevar metal líquido hacia la cavidad, en lugar de forzarlo con presión positiva de aire desde abajo. Hay varios beneficios en la técnica de vacío, relacionados con la fundición a baja presión: se reduce la porosidad por aire y los defectos relacionados con ésta, y se da mayor resistencia al producto fundido.

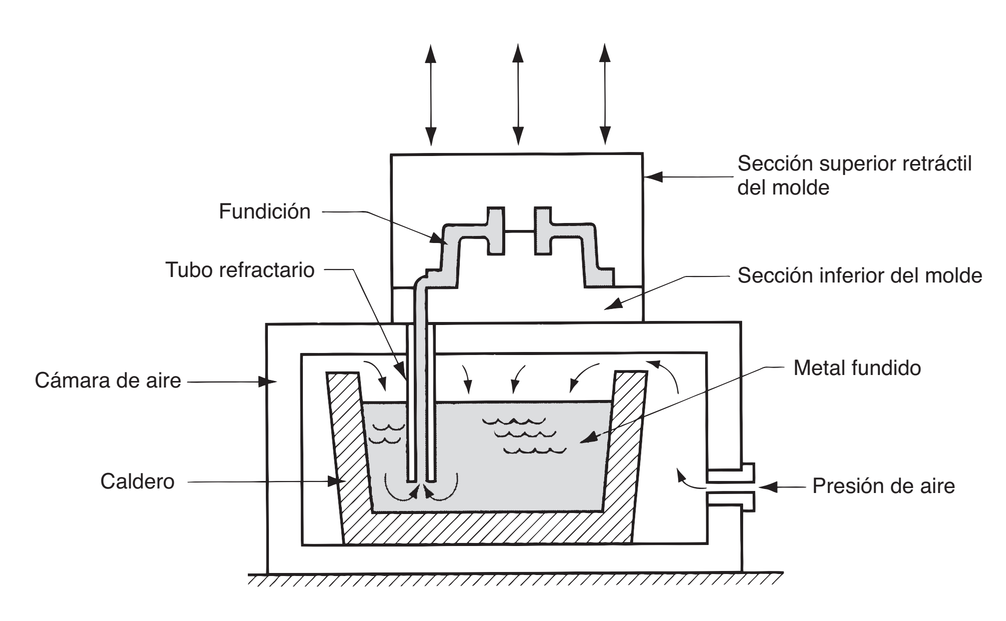


FIGURA 11.11 Fundición a baja presión. El diagrama muestra el uso de la presión baja del aire para forzar al metal fundido en el recipiente a que pase a la cavidad del molde. La presión se mantiene hasta que el fundido se ha solidificado.

11.3.3 Fundición con troquel

La ***fundición con troquel*** es un proceso de fundición con molde permanente en el que se inyecta a presión elevada metal fundido a la cavidad del molde. Las presiones comunes son de 7 a 350 MPa (1 000 a 50 000 lb/in^2). La presión se mantiene durante la solidificación, después de la cual el molde se abre y se retira la pieza. Los moldes para esta operación de fundido reciben el nombre de troqueles, de donde deriva su nombre el proceso. La característica más notable que diferencia a este proceso de los demás de la categoría de moldes permanentes, es el uso de presión elevada para forzar el paso del metal a la cavidad del troquel.

Las operaciones de fundición con troquel se llevan a cabo en máquinas especiales (véase la nota histórica 11.2). Éstas se diseñan para que las dos mitades del molde embonen y cierren con exactitud, y las mantengan cerradas mientras se fuerza al metal líquido a pasar a la cavidad. En la figura 11.12 se aprecia la configuración general. Hay dos tipos principales de máquinas para fundición con troquel: 1) cámara caliente y 2) cámara fría, que se diferencian en la manera en que el metal derretido se inyecta a la cavidad.

Nota histórica 11.2 *Máquinas de fundición con troquel.*

La máquina moderna de fundición con troquel tiene sus orígenes en la industria de la impresión, y en la necesidad que hubo en la segunda mitad del siglo XIX de satisfacer a una población cada vez más letrada con apetito creciente por la lectura. El linotipo, inventado y desarrollado por O. Mergenthaler a finales del siglo XIX, es una máquina que produce tipos de imprenta. Es una máquina fundidora porque funde una línea de caracteres de tipos hechos de plomo, para que se utilicen en la preparación de placas de imprenta. El nombre ***linotipo*** se deriva del hecho de que la máquina produce una línea de caracteres de tipos durante cada ciclo de operación. La máquina fue usada por primera vez con éxito en forma comercial en la ciudad de Nueva York, en 1886, por ***The Tribune***.

El linotipo dio factibilidad a las máquinas de fundición mecanizadas. La primera de éstas la patentó H. Doehler en 1905 (esta máquina está en exhibición en Smithsonian Institution, en Washington, D.C.). En 1907, E. Wagner inventó la primera máquina de fundición con troquel que utilizó el diseño de cámara caliente. Se empleó por vez primera durante la Segunda Guerra Mundial para fundir partes de binoculares y máscaras de gas.

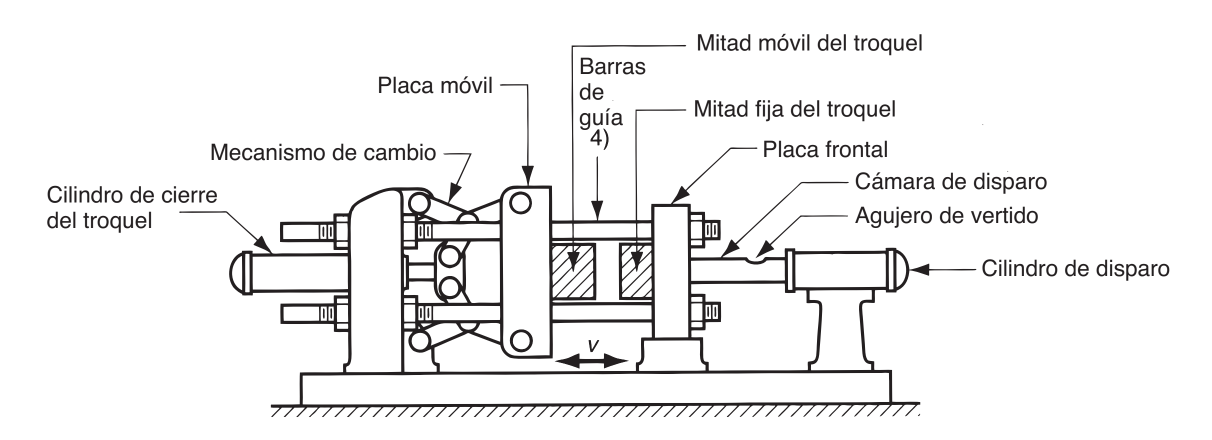


FIGURA 11.12 Configuración general de una máquina de fundición con troquel (cámara fría).

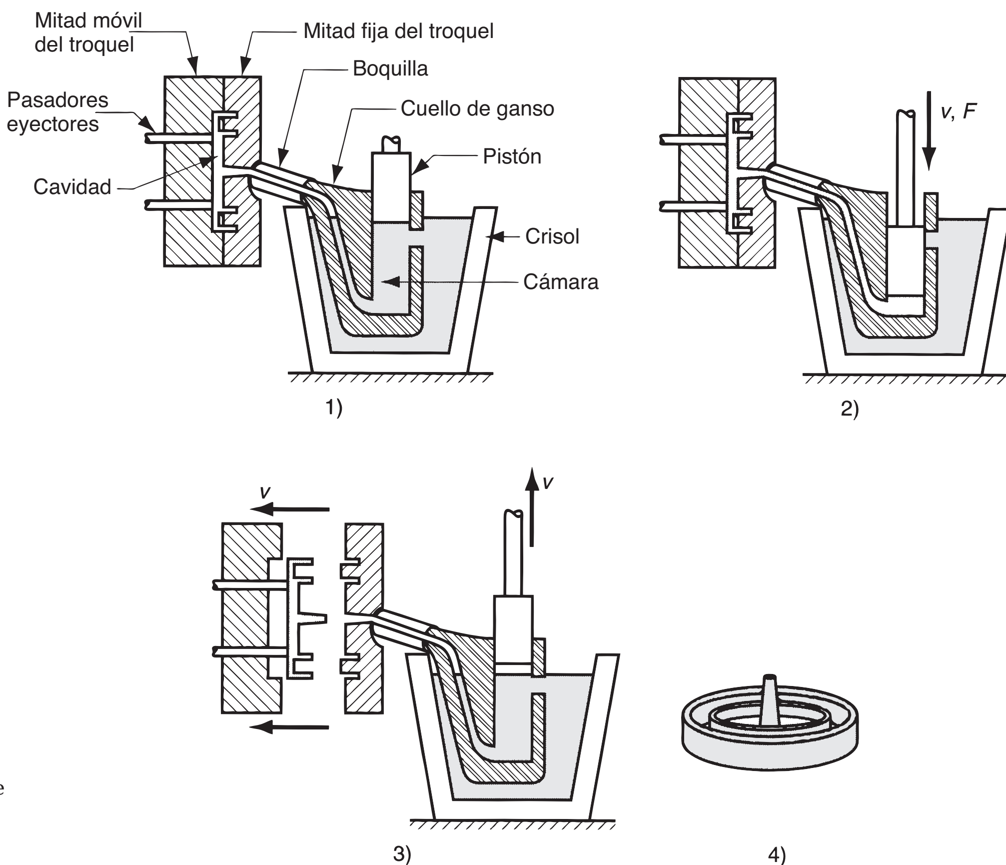


FIGURA 11.13 Ciclo de la fundición con cámara caliente: 1) con troquel cerrado y pistón fuera, el metal derretido fluye a la cámara; 2) el pistón fuerza al metal a fluir hacia la cámara para que pase al troquel, manteniendo la presión durante el enfriamiento y solidificación; y 3) se retira el pistón, se abre el troquel y se expulsa la pieza solidificada. En el inciso 4 se ilustra el elemento terminado.

En las ***máquinas de cámara caliente*** el metal se derrite en un contenedor adosado a la máquina, y se emplea un pistón para inyectar metal líquido a alta presión hacia el troquel. Las presiones de inyección comunes son de 7 a 35 MPa (1 000 a 5 000 lb/in^2). El ciclo de fundición se resume en la figura 11.13. No son raras tasas de producción de hasta 500 piezas por hora. La fundición con troquel de cámara caliente plantea un reto especial al sistema de inyección debido a que gran parte de éste se encuentra sumergido en el metal fundido. Por tanto, el proceso está limitado a aplicaciones con metales de punto bajo de fusión que no impongan ataque químico al pistón y otros componentes mecánicos. Los metales incluyen zinc, estaño, plomo y en ocasiones magnesio.

En las ***máquinas de fundición con troquel de cámara fría*** se vierte metal derretido hacia una cámara que no está caliente, desde un contenedor externo, y se emplea un pistón para inyectarlo a alta presión hacia la cavidad del troquel. Las presiones de inyección comunes que se usan en estas máquinas son de 14 a 140 MPa (2 000 a 20 000 lb/in^2). En la figura 11.14 se explica el ciclo de producción. En comparación con las máquinas de cámara caliente, las tasas del ciclo por lo general no son tan rápidas debido a la necesidad de una cuchara de colada para vaciar el metal líquido desde una fuente externa hacia la cámara. No obstante, este proceso de fundición es una operación de producción elevada. Las máquinas de cámara fría se usan por lo común para fundir aleaciones de aluminio, latón y magnesio. Aleaciones con punto de fusión bajo (zinc, estaño, plomo) también pueden fundirse en máquinas de cámara fría, pero por lo general las ventajas del proceso con cámara caliente favorecen su uso sobre estos metales.

Generalmente, los moldes que se usan en operaciones de fundición con troquel están hechos de acero para herramientas, acero para moldes o acero al níquel con bajo contenido de carbono. También se emplean tungsteno y molibdeno con calidades refractarias buenas, en especial para fundir acero con troquel y hierro colado. Los troqueles pueden ser de una cavidad o varias. En las figuras 11.13 y 11.14 se ilustran troqueles de una sola cavidad.

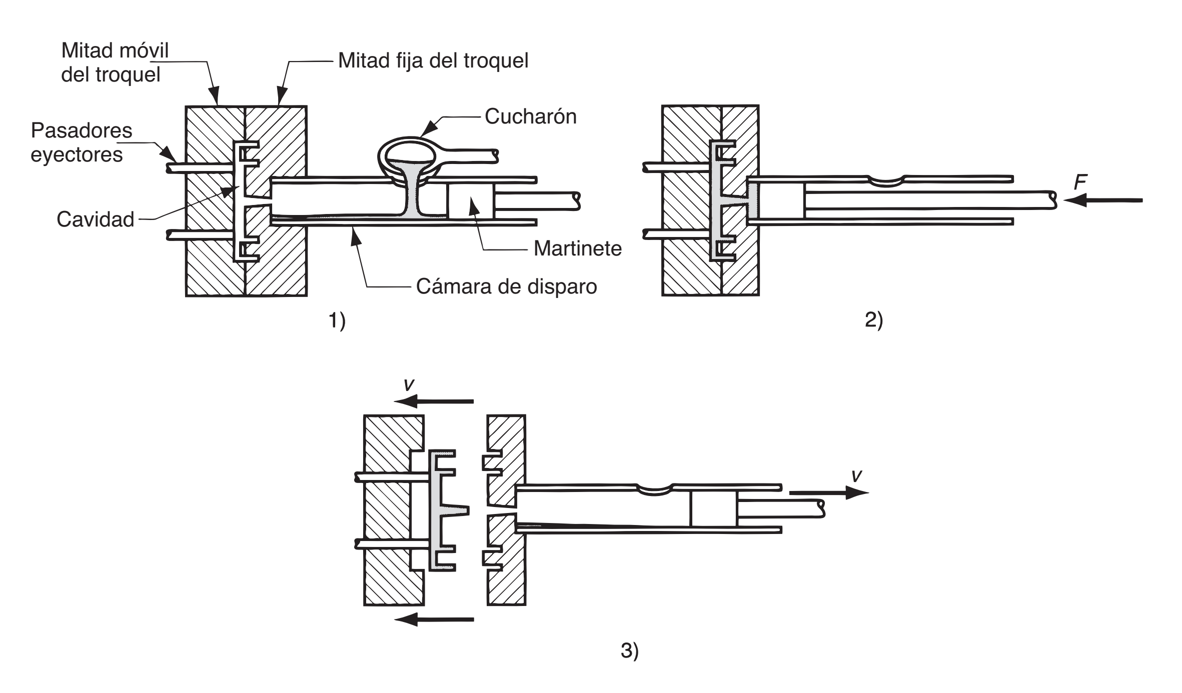


FIGURA 11.14 Ciclo de fundición con cámara fría: 1) con troquel cerrado y martinete retirado, el metal fundido se vierte a la cámara; 2) el martinete fuerza al metal a fluir en el troquel, manteniendo la presión durante el enfriamiento y solidificación; y 3) se retira el martinete, el troquel se abre y la pieza es expulsada. (El sistema de paso está simplificado).

Los pasadores eyectores se requieren para retirar la pieza del troquel cuando éste se abre, como se observa en los diagramas. Estos pasadores empujan la pieza hacia afuera de la superficie del molde de modo que pueda retirarse. También deben rociarse lubricantes en las cavidades, a fin de impedir que estén pegajosas.

Debido a que los materiales del troquel no tienen porosidad natural, y que el metal fundido fluye con rapidez hacia éste durante la inyección, deben hacerse agujeros de ventilación y vías de paso en los troqueles, en la línea de separación, para evacuar el aire y gases de la cavidad. Las ventilaciones son muy pequeñas; en realidad se llenan con metal durante la inyección. Este metal debe recortarse de la pieza más tarde. Asimismo, en la fundición con troquel es común la formación de una ***rebaba***, que entra como metal líquido a presión alta al espacio pequeño entre las mitades del troquel, en la línea de separación o en los claros alrededor de los núcleos y los pasadores eyectores. Esta rebaba debe recortarse del fundido, junto con el bebedero y el sistema de paso.

Entre las ventajas de la fundición con troquel se incluyen las siguientes: 1) son posibles tasas elevadas de producción, 2) es económica para cantidades grandes de producción, 3) se pueden tener tolerancias estrechas, del orden de ±0.076 mm (±0.003 in) para piezas pequeñas, 4) buen acabado de la superficie, 5) son posibles las secciones delgadas, por debajo de 0.5 mm (0.020 in) y 6) el enfriamiento rápido proporciona un tamaño pequeño del grano y buena resistencia al fundido. La limitación de este proceso, además de los metales por fundir, es la restricción de la forma. La configuración geométrica de la pieza debe permitir su retiro de la cavidad del troquel.

11.3.4 Fundición centrífuga

La ***fundición centrífuga*** se refiere a varios métodos de fundición en los que el molde gira a gran velocidad de modo que la fuerza centrífuga distribuye el metal derretido a las regiones externas de la cavidad del troquel. El grupo incluye 1) fundición centrífuga real, 2) fundición semicentrífuga y 3) fundición centrífugada.

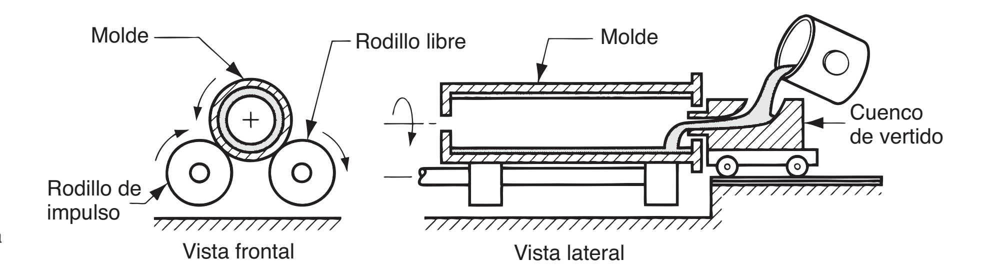


FIGURA 11.15 Arreglo para la fundición centrífuga real.

Fundición centrífuga real En la fundición centrífuga real, se vierte metal fundido a un molde rotatorio para producir una pieza tubular. Algunos ejemplos de las piezas que se fabrican con este proceso incluyen tuberías, tubos, boquillas y anillos. En la figura 11.15 se ilustra un arreglo posible. Se vierte metal derretido por un extremo del molde horizontal rotatorio. En algunas operaciones, la rotación del molde comienza después del vertido y no antes. La gran velocidad de rotación ocasiona que las fuerzas centrífugas hagan que el metal adopte la forma de la cavidad del molde. Así, la forma exterior del fundido puede ser redonda, octagonal, hexagonal, etcétera. Sin embargo, la forma interior del fundido es (en teoría) perfectamente circular, debido a las fuerzas con simetría radial que actúan.

La orientación del eje de rotación del molde es horizontal o vertical, y el más común es el primero. A continuación se estudiará cuán rápido debe girar el molde en una ***fundición centrífuga horizontal***, a fin de que el proceso tenga éxito. La fuerza centrífuga está definida por la siguiente ecuación de física:

$$F = \frac{mv^2}{R} \tag{11.2}$$

donde F = fuerza, N (lb); m = masa, kg (lbm); v = velocidad, m/s (ft/s); y R = radio interior del molde, m (ft). La fuerza de gravedad es su peso, $W = mg$, donde W se expresa en kg (lb), y g = aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2 (32.2 ft/s^2). El llamado factor G, GF, es la razón de la fuerza centrífuga dividida entre el peso:

$$GF = \frac{\frac{mv^2}{R}}{mg} = \frac{mv^2}{Rmg} = \frac{v^2}{Rg} \tag{11.3}$$

La velocidad, v, se expresa como $2\pi RN/60 = \pi RN/30$, donde N = velocidad rotacional, rev/min. Al sustituir esta expresión en la ecuación (11.3), se obtiene

$$GF = \frac{R\left(\frac{\pi N}{30}\right)^2}{g} \tag{11.4}$$

Al reacomodar ésta a fin de resolverla para la velocidad rotatoria, N, y con el uso del diámetro, D, en vez del radio en la ecuación resultante, se tiene

$$N = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2gGF}{D}} \tag{11.5}$$

donde D es el diámetro interior del molde, m (ft). Si el factor G es demasiado pequeño en la fundición centrífuga, el metal líquido no se verá forzado a permanecer contra la pared del molde durante la mitad superior de la trayectoria circular, sino que "lloverá" dentro de la cavidad. Hay un deslizamiento entre el metal fundido y la pared del molde, lo que significa que la velocidad rotacional del metal es menor que la del molde. Con una base empírica, se ha encontrado [2] que para la fundición centrífuga horizontal son apropiados valores de GF de 60 a 80, aunque esto depende hasta cierto punto del metal que se funde.

Ejemplo 11.2 Velocidad de rotación en la fundición centrífuga real

Una operación de fundición centrífuga real se lleva a cabo en forma horizontal, a fin de fabricar secciones de tubo de cobre con diámetro exterior (DE) de 25 cm y diámetro interior (DI) de 22.5 cm. ¿Cuál es la velocidad rotacional que se requiere si se va a usar un factor G de 65 para fundir el tubo?

Solución: El diámetro interior del molde D = DE del fundido es de 25 cm = 0.25 m. Con la ecuación (11.5) se calcula la velocidad rotacional requerida, como sigue:

$$N = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2(9.8)(26)}{0.25}} = \mathbf{681.7\ rev\ /\ min.}$$

En la ***fundición centrífuga vertical***, el efecto de la gravedad sobre el metal líquido ocasiona que la pared del fundido sea más gruesa en la base que en la parte superior. El perfil interior de la pared del fundido adopta una forma parabólica. La diferencia de los radios interiores en las partes superior e inferior está relacionada con la velocidad de rotación, del modo siguiente:

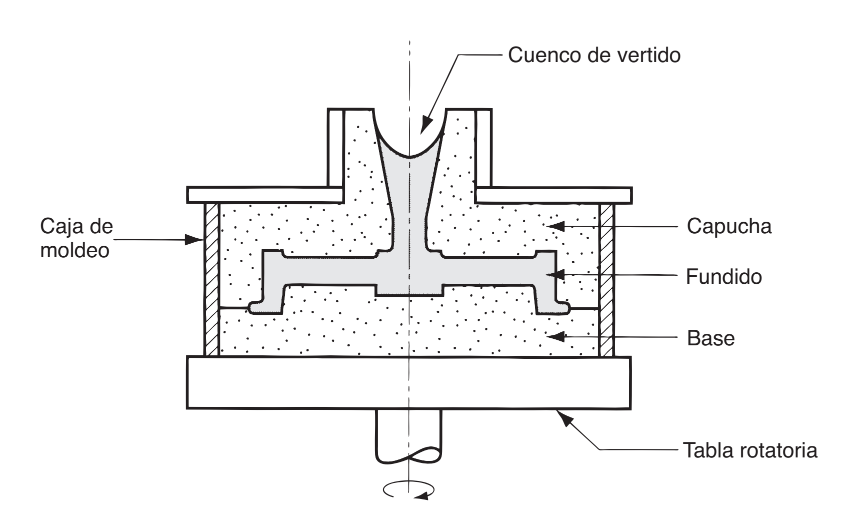
$$N = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2gL}{R_t^2 - R_b^2}} \tag{11.6}$$

donde L es la longitud vertical del fundido, m (ft); R_t es el radio interior en la parte superior del fundido, m (ft); y R_b es el radio interior en la parte inferior del fundido, m (ft). La ecuación (11.6) se utiliza para determinar la velocidad rotacional requerida para la fundición centrífuga vertical, dadas las especificaciones para los radios interiores superior e inferior. En la fórmula se observa que para R_t igual a R_b, la velocidad de rotación N tendría que ser infinita, lo que es imposible, por supuesto. Como algo práctico, las longitudes de las piezas que se fabrican con fundición centrífuga vertical por lo general no son más del doble que sus diámetros. Esto es muy satisfactorio para rodamientos y otros elementos que tienen diámetros grandes en relación con sus longitudes, en especial si va a emplearse maquinado para dar la medida exacta al diámetro interior.

Los fundidos hechos con fundición centrífuga real se caracterizan por su densidad elevada, en especial en las regiones exteriores de la pieza, donde F es máxima. La contracción por la solidificación en el exterior del tubo fundido no es un factor, porque la fuerza centrífuga distribuye continuamente metal derretido en dirección de la pared del molde durante la solidificación. Cualesquiera impurezas del fundido tienden a estar en la pared interna y de ser necesario se eliminan con maquinado.

Fundición semicentrífuga Con este método, se emplea la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas, como se aprecia en la figura 11.16, en vez de piezas tubulares. La

FIGURA 11.16 Fundición semicentrífuga



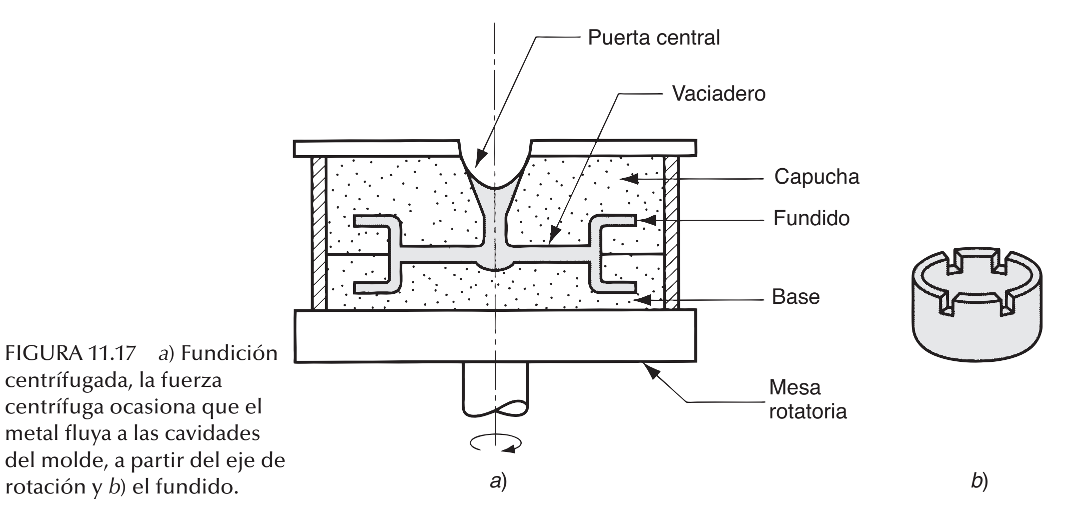


FIGURA 11.17 *a*) Fundición centrífugada, la fuerza centrífuga ocasiona que el metal fluya a las cavidades del molde, a partir del eje de rotación y *b*) el fundido.

velocidad de rotación en la fundición semicentrífuga, por lo general se establece de modo que se obtengan factores G de alrededor de 15 [2], y los moldes se diseñan con mazarotas en el centro a fin de suministrar metal. La densidad del metal en el fundido final es mayor en las secciones exteriores que en el centro de la rotación. El proceso se emplea con frecuencia para piezas en las que el centro de la fundición se maquina, lo que elimina la porción donde la calidad es más baja. Ejemplos de fundidos elaborados con este proceso son las ruedas y las poleas. Para la fundición semicentrífuga es frecuente emplear moldes desechables, como lo sugiere la ilustración del proceso.

Fundición centrífugada En la fundición centrífugada, véase la figura 11.17, el molde está diseñado con las cavidades de la pieza localizada hacia afuera del eje de rotación, de modo que el metal vertido en el molde se distribuya hacia ellas por medio de la fuerza centrífuga. El proceso se emplea para piezas pequeñas y no es un requerimiento la simetría radial de la pieza, como sí lo es para los otros dos métodos de fundición centrífuga.

11.4 LA PRÁCTICA DE LA FUNDICIÓN

En todos los procesos de fundido, debe calentarse el metal hasta alcanzar el estado líquido para verterlo o forzarlo de algún modo a que pase al molde. El calentamiento y la fusión se llevan a cabo en un horno. Esta sección se ocupa de los diversos tipos de hornos que se emplean en las fundidoras, así como de las prácticas de vertido para llevar el metal derretido del horno al molde.

11.4.1 Hornos

Los tipos de hornos más comunes que se emplean en las fundidoras son: 1) cubilotes, 2) hornos de combustible directo, 3) crisoles, 4) hornos de arco eléctrico y 5) hornos de inducción. La selección del tipo más apropiado de horno depende de factores tales como: aleación por fundir; sus temperaturas de fusión y vertido; requerimientos de capacidad del horno; costos de la inversión, la operación y el mantenimiento; y las consideraciones sobre contaminación ambiental.

Cubilotes Un cubilote es un horno cilíndrico vertical equipado con un canal de paso (o bebedero de sangrado) cerca de su base. Los cubilotes sólo se usan para hierros colados, y aunque también se emplean otros hornos, el mayor peso en toneladas de hierro colado se obtiene en cubilotes. En la figura 11.18 se ilustra la construcción general y características

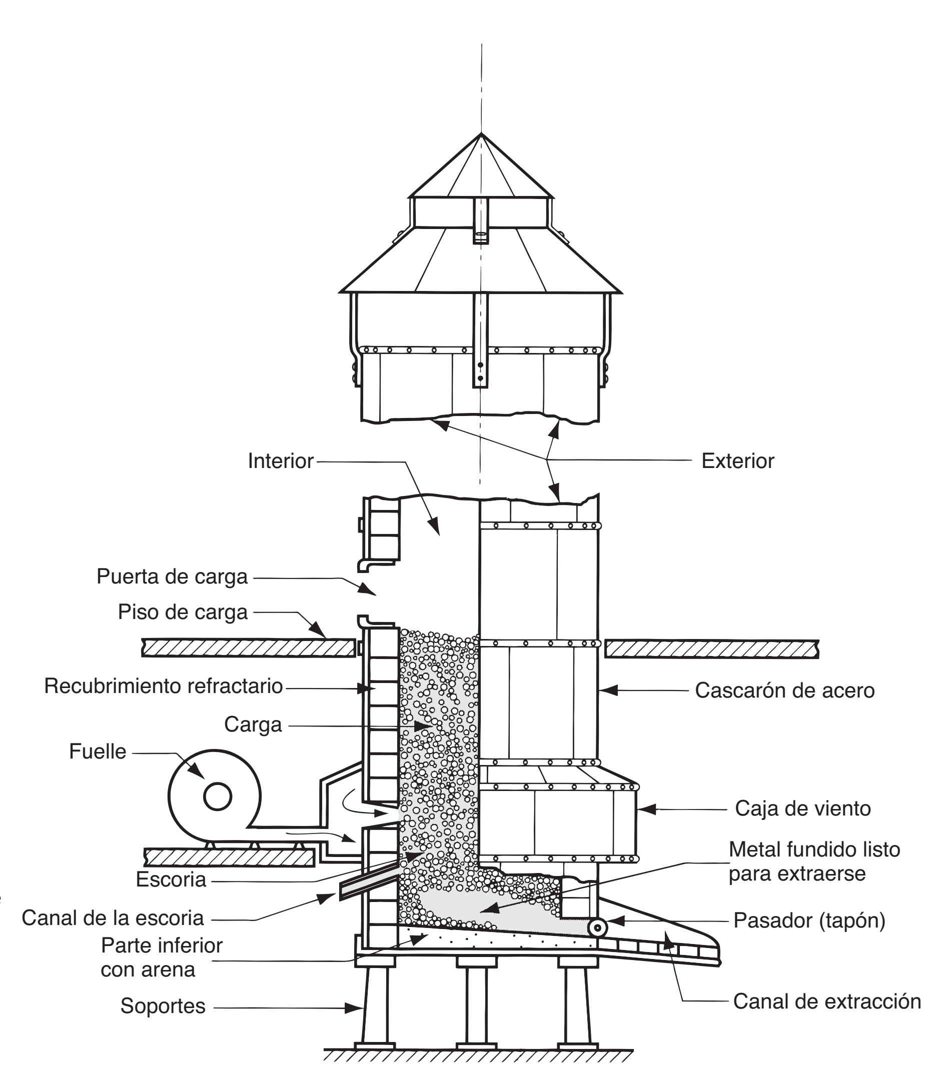


FIGURA 11.18 Cubilote que se usa para obtener hierro colado. El horno que se muestra es común para una fundidora pequeña y se omiten los detalles del sistema de control de emisiones que se requiere para un cubilote moderno.

de operación. Consiste en un cascarón grande de placa de acero recubierta con material refractario. La "carga" consiste en hierro, coque, fundente y tal vez elementos de aleación, y se introduce a través de una puerta que se localiza a menos de la mitad de la altura del cubilote. Por lo general, el hierro es una mezcla del tipo de primera fundición (arrabio) y chatarra (incluidos mazarotas, vaciaderos y bebederos solidificados, procedentes de fundidos anteriores). El coque es el combustible que se usa para calentar el horno. Se introduce aire forzado a través de las aberturas cerca de la base del cascarón para la combustión del coque. El fundente es un compuesto básico como la caliza, que reacciona con la ceniza del coque y otras impurezas para formar la escoria. Ésta sirve para cubrir el fundido, e impide que reaccione con el ambiente dentro del cubilote, y también reduce la pérdida de calor. Conforme la mezcla se calienta y ocurre la fundición del hierro, se desaloja periódicamente el horno para verter metal líquido.

Hornos de combustible directo Un horno de combustible directo contiene un hogar abierto pequeño en el que se calienta la carga de metal por medio de quemadores de combustible ubicados en uno de sus lados. El techo del horno ayuda a la acción de calentar por medio de reflejar la flama hacia abajo contra la carga. El combustible común es gas natural, y los productos de la combustión salen del horno a través de un cañón. En la parte inferior del hogar hay un agujero de salida para extraer el metal fundido. Los hornos de combustible directo por lo general se emplean en el fundido de metales no ferrosos tales como aleaciones a base de cobre y aluminio.

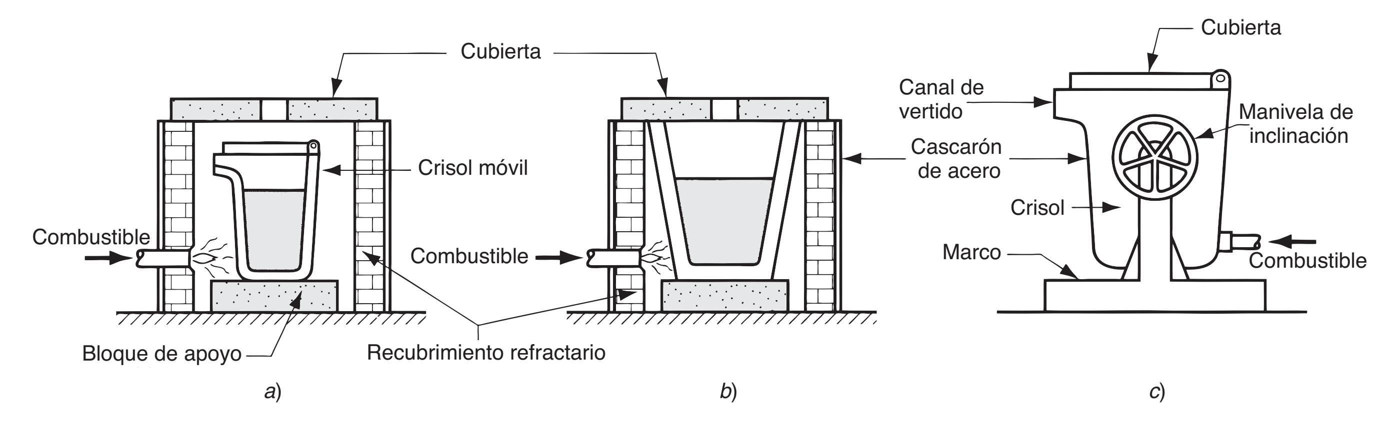


FIGURA 11.19 Tres tipos de crisoles: *a*) crisol móvil, *b*) crisol estacionario y *c*) crisol de volteo.

Crisoles Estos hornos funden el metal sin que tenga contacto directo con una mezcla combustible. Por esta razón, en ocasiones se les llama ***hornos de combustible indirecto***. En las fundidoras se utilizan tres tipos de crisoles: *a*) móvil, *b*) estacionario y *c*) de volteo, los cuales se ilustran en la figura 11.19. Todos emplean un contenedor (el crisol) hecho de material refractario apropiado (por ejemplo, una mezcla de arcilla y grafito) o una aleación de acero de alta temperatura, para contener la carga. En el ***crisol móvil***, éste se coloca en un horno y se calienta lo suficiente para derretir la carga de metal. Los combustibles comunes para estos hornos son petróleo, gas o carbón en polvo. Cuando el metal se derrite, el crisol se eleva fuera del horno y se usa como cuenco de vertido. Los otros dos tipos, que en ocasiones reciben el nombre de ***hornos de vasija***, tienen el horno para calentar y el contenedor como unidad integrada. En el ***horno de crisol estacionario***, el horno es estacionario y el metal fundido se extrae del contenedor con un cucharón. En el ***horno de crisol de volteo***, todo el conjunto se inclina para hacer el vertido. Los crisoles se emplean para metales no ferrosos tales como bronce, latón y aleaciones de zinc y aluminio. Las capacidades de los hornos por lo general están limitadas a varios cientos de libras.

Hornos de arco eléctrico En este tipo de horno, la carga se funde debido al calor generado por un arco eléctrico. Existen varias configuraciones, con dos o tres electrodos (véase la figura 6.9). El consumo de energía es alto, pero los hornos eléctricos se diseñan para que tengan capacidad alta de fundición (23 000 a 45 000 kg/h, o 25 a 50 ton/h), y se usan sobre todo para fundir acero.

Hornos de inducción Un horno de inducción emplea corriente alterna que pasa a través de una bobina para desarrollar un campo magnético en el metal, y la corriente inducida que resulta ocasiona el calentamiento rápido y la fundición del metal. En la figura 11.20 se ilustran las características de un horno de inducción para las operaciones de fundición. El campo de fuerza electromagnética hace que ocurra una acción mezcladora en el metal líquido. Asimismo, como el metal no entra en contacto directo con los elementos calientes, el ambiente en que tiene lugar se puede controlar de cerca. Todo esto da como resultado metales fundidos de calidad y pureza altas, y los hornos de inducción se emplean para casi cualquier aleación cuando esos requerimientos son importantes. En el trabajo de fundición son comunes las aplicaciones de fundir aleaciones de acero, hierro y aluminio.

11.4.2 Vertido, limpieza y tratamiento térmico

En ocasiones se lleva el metal derretido del horno de fundición al molde por medio de crisoles. Con más frecuencia, la transferencia se lleva a cabo por medio de ***cuencos*** de varias

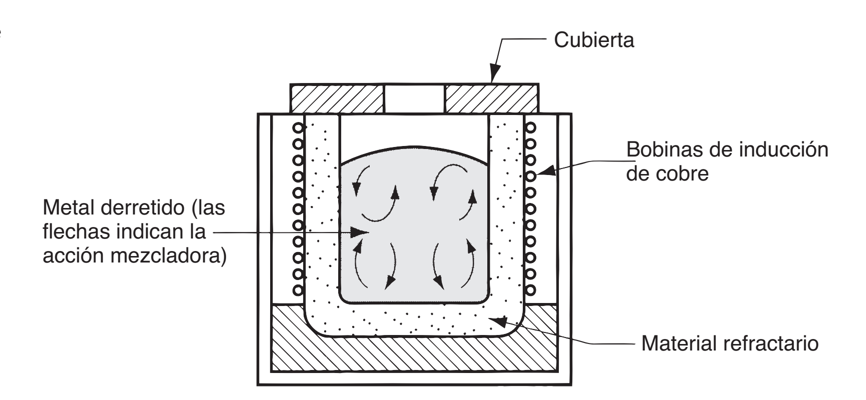


FIGURA 11.20 Horno de inducción.

clases. Estos cuencos reciben el metal del horno y permiten que se vierta de manera conveniente en los moldes. En la figura 11.21 se ilustran dos cuencos comunes, uno es para manejar volúmenes grandes de metal derretido por medio de una grúa elevada y el otro es un "cuenco para dos hombres", para moverlo en forma manual y verter cantidades pequeñas.

Uno de los problemas del vertido es que podría introducirse metal fundido oxidado al molde. Los óxidos de metal reducen la calidad del producto y quizás hagan que el fundido sea defectuoso, por lo que se toman medidas para minimizar la entrada de estos óxidos en el molde durante el vertido. En ocasiones se emplean filtros para capturar los óxidos y otras impurezas conforme se vierte el metal desde el canal, y se emplean fundentes para cubrir el metal derretido a fin de retardar la oxidación. Además, se han creado cuencos para verter el metal líquido desde el fondo, ya que los óxidos se acumulan en la superficie de arriba.

Después de que el fundido se ha solidificado y retirado del molde, por lo general se requiere cierto número de etapas adicionales. Estas operaciones incluyen 1) recortar, 2) retirar el núcleo, 3) limpiar las superficies, 4) inspeccionar, 5) reparar, si se requiriera, y 6) dar tratamiento térmico. En las fundidoras, se conoce al conjunto de las etapas 1 a 5 como "limpieza". El grado en que se requieren estas operaciones adicionales varía según los procesos de fundido y los metales. Cuando se necesitan, por lo general son intensivas en mano de obra y costosas.

El ***recorte*** involucra la remoción de los bebederos, vaciaderos, mazarotas, rebabas en la línea de separación, coronas y cualquier exceso de metal de la pieza fundida. En el caso de aleaciones fundidas frágiles y cuando las secciones transversales sean relativamente pequeñas, es posible romper estos apéndices del fundido. De otro modo, hay que martillar, cortar, cortar con sierra, esmerilar o usar varios métodos de corte con soplete.

Si se usan núcleos para fundir la pieza , hay que retirarlos. La mayor parte de núcleos están unidos por medio químico o con arena y aceite, y es frecuente que caigan del fundido

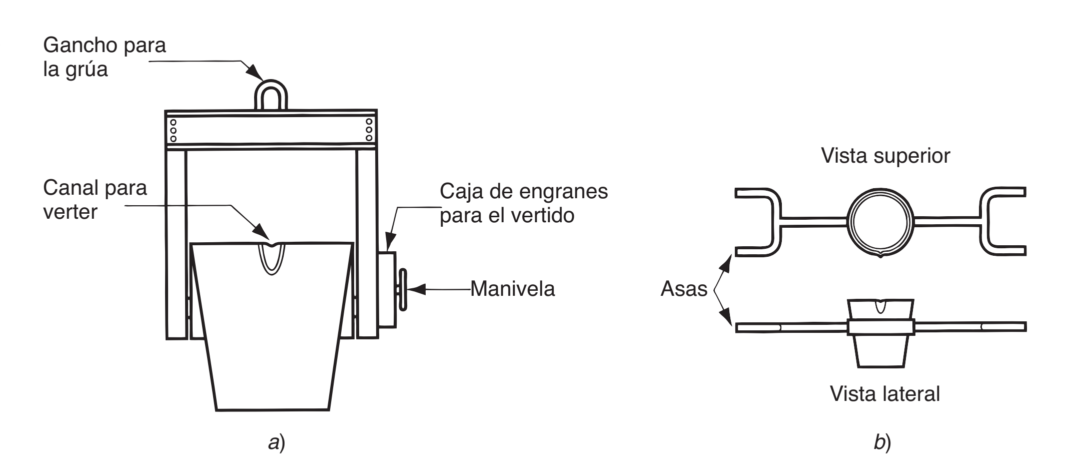


FIGURA 11.21 Dos tipos comunes de cuencos: *a*) cuento de grúa y *b*) cuenco para dos hombres.

si el aglutinante se deteriora. En ciertos casos se retiran por medio del golpeo al fundido, ya sea en forma manual o mecánica. En instancias raras los núcleos se retiran en forma química con la disolución del agente aglutinante que se usó en el núcleo de arena. Los núcleos sólidos deben martillarse o presionarse.

La limpieza de las superficies es lo más importante en el caso de la fundición con arena. En muchos de los otros métodos de fundición, en especial en los procesos con molde permanente, puede evitarse este paso. La ***limpieza de las superficies*** involucra la remoción de la arena de la superficie del fundido y otras maneras de mejorar su apariencia. Los métodos que se usan para limpiar superficies incluyen la agitación, el soplo de aire con granos de arena gruesa o balines de metal, uso de cepillos de alambre, pulido y limpieza con baño químico (véase el capítulo 28).

Es posible que el fundido tenga defectos, por lo que se necesita inspección para detectar su presencia. En la sección siguiente se estudian esos temas de la calidad.

Es frecuente que los fundidos reciban tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades, ya sea con operaciones subsecuentes tales como maquinar o resaltar las propiedades que se desean para la aplicación de la pieza en el servicio.

11.5 CALIDAD DEL FUNDIDO

Hay muchas formas de que las cosas salgan mal en una operación de fundición, lo que da como resultado defectos de calidad del producto. En esta sección se recopila una lista de los defectos comunes que ocurren durante el fundido y se indican los procedimientos de inspección para detectarlos.

Defectos de fundición Algunos defectos son comunes a todos los procesos de fundición; se ilustran en la figura 11.22 y se describen brevemente a continuación:

a) ***Vacíos*** son fundidos que se solidifican antes de llenar por completo la cavidad del molde. Las causas comunes incluyen: 1) insuficiente fluidez del metal derretido, 2) temperatura de vertido muy baja, 3) vertido muy despacio y 4) sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.

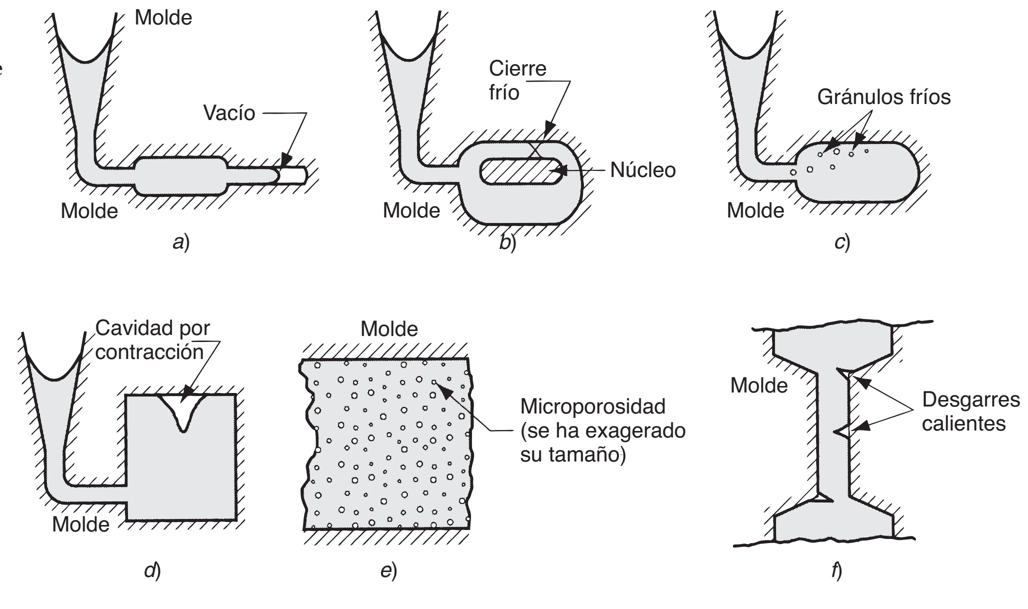


FIGURA 11.22 Algunos defectos comunes de los fundidos: *a*) vacíos, *b*) cierre frío, *c*) gránulos fríos, *d*) cavidad por contracción *e*) microporosidad y *f*) desgarre caliente.

b) ***Cierres fríos*** ocurren cuando dos porciones del metal fluyen juntas, pero no hay fusión entre ellas debido a la solidificación prematura. Sus causas son similares a las de los vacíos.

c) ***Gránulos fríos*** resultan de las salpicaduras durante el vertido, lo que ocasiona la formación de glóbulos sólidos de metal que quedan atrapados en el fundido. Este defecto puede evitarse con procedimientos de vertido y diseños del sistema de paso que eviten las salpicaduras.

d) ***Cavidad de fuga*** es una depresión en la superficie o un vacío interno en el fundido, ocasionado por fugas en la solidificación que restringen la cantidad de metal derretido disponible en la última región que se solidifica. Es frecuente que ocurra cerca de la parte superior del fundido, en cuyo caso se conoce como "rechupe" [véase la figura 10.8(3)]. Con frecuencia, el problema se resuelve con el diseño apropiado de la mazarota.

e) ***Microporosidad*** consiste en una red de vacíos pequeños distribuidos en el fundido, ocasionados por la falta de solidificación localizada del metal derretido final en la estructura dendrítica. Este defecto se asocia por lo general con aleaciones, debido a la manera fraccionada en que ocurre la solidificación en esos metales.

f) ***Desgarre caliente*** también llamado ***agrietamiento caliente***, ocurre cuando el fundido se ve impedido de contraerse por un molde que no lo propicia durante las etapas finales de la solidificación, o en las primeras del enfriamiento después de solidificarse. El defecto se manifiesta como la separación del metal (de ahí los términos ***desgarre*** y ***agrietamiento***) en un punto de esfuerzo grande a la tensión ocasionado por la incapacidad del metal de contraerse en forma natural. En la fundición con arena y otros procesos con moldes desechables, se evita haciendo que el molde sea colapsable. En los procesos con molde permanente, el desgarre caliente disminuye si se retira la pieza del molde inmediatamente después de la solidificación.

Algunos defectos se relacionan con el uso de moldes de arena, y por ello ocurren sólo en los fundidos con arena. En menor grado, otros procesos con moldes desechables también son susceptibles de provocar estos problemas. En la figura 11.23 se ilustran los defectos que ocurren sobre todo en la fundición con arena, y se describen en seguida:

a) ***Sopladura*** es un defecto que consiste en una cavidad de gas en forma de globo, ocasionada por la liberación de gases del molde durante el vertido. Ocurre en o cerca de la

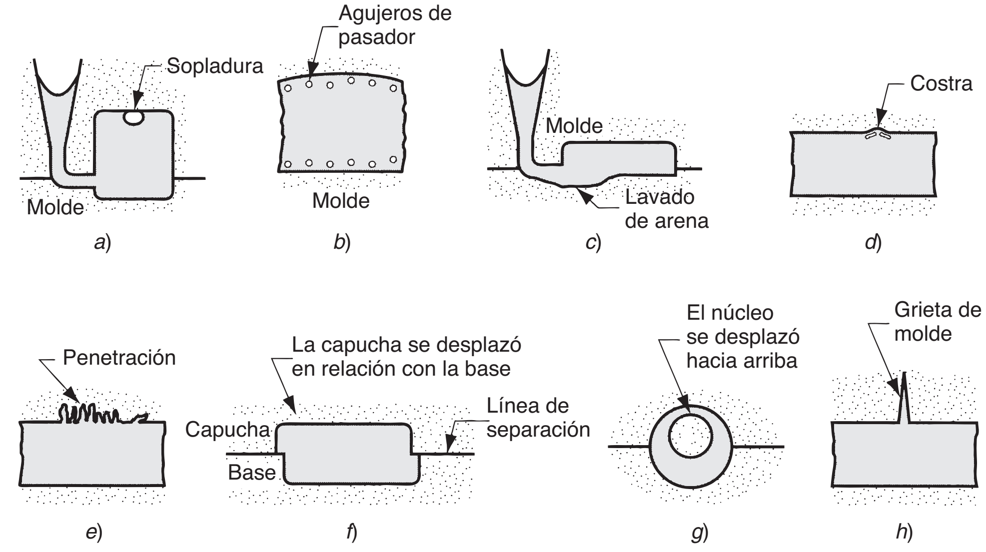


FIGURA 11.23 Defectos comunes en los fundidos con arena: *a*) sopladura, *b*) agujeros de pasador, *c*) lavado de arena, *d*) costras, *e*) penetración, *f*) desplazamiento del molde, *g*) desplazamiento del núcleo y *h*) agrietamiento del molde.

superficie del fundido, cerca de la parte superior de éste. Las causas habituales son baja permeabilidad, mala ventilación y contenido de humedad alto del molde de arena.

b) ***Agujeros de pasador*** también los ocasiona la liberación de gases durante el vertido y consisten en muchas cavidades pequeñas por gases formadas en o ligeramente debajo de la superficie del fundido.

c) ***Lavado de arena*** es una irregularidad en la superficie del fundido que se genera por la erosión del molde de arena durante el vertido; el contorno de la erosión se forma en la superficie de la pieza fundida final.

d) ***Costras*** son áreas rugosas en la superficie del fundido debido a incrustaciones de arena y metal. Las ocasionan porciones de la superficie del molde que se desprenden durante la solidificación y quedan incrustadas en la superficie del fundido.

e) ***Penetración*** se refiere a un defecto de la superficie que ocurre cuando la fluidez del metal líquido es alta y penetra en el molde de arena o núcleo de arena. Una vez solidificado, la superficie del fundido consiste en una mezcla de granos de arena y metal. La compactación estrecha del molde de arena ayuda a disminuir esta condición.

f) ***Desplazamiento del molde*** se refiere a un defecto ocasionado por el movimiento lateral de la capucha del molde en relación con la base, lo que da por resultado un escalón en el producto fundido, en la línea de separación.

g) ***Desplazamiento del núcleo*** es similar al del molde, pero es el núcleo el que se mueve, y por lo general su desplazamiento es vertical. El desplazamiento del núcleo y molde es ocasionado por la flotación del metal fundido (véase la sección 11.1.3).

h) ***Agrietamiento del molde*** ocurre cuando la resistencia del molde es insuficiente y se presenta una grieta, en la que entra metal líquido y forma una "rebaba" en el fundido final.

Métodos de inspección Los procedimientos de inspección en una fundidora incluyen los siguientes: 1) inspección visual para detectar defectos obvios tales como vacíos, cierres fríos y defectos superficiales severos; 2) mediciones dimensionales para garantizar que se cumple con las tolerancias, y 3) pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y de otro tipo, relacionadas con la calidad inherente del metal que se funde [5]. Las pruebas de la categoría 3 incluyen: *a*) pruebas de presión, para localizar fugas en el fundido; *b*) métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de penetradores fluorescentes y pruebas supersónicas, para detectar defectos superficiales o internos en el fundido; y *c*) pruebas mecánicas para determinar propiedades tales como resistencia a la tensión y dureza. Si los defectos que se descubren no son demasiado serios, con frecuencia es posible salvar el fundido por medio de soldadura, esmerilado u otros métodos de rescate con los que el cliente esté de acuerdo.

11.6 LOS METALES PARA FUNDICIÓN

La mayoría de fundidos comerciales están hechos con aleaciones y no con metales puros. Por lo general, las aleaciones son más fáciles de fundir y las propiedades del producto resultante son mejores. Las aleaciones de fundición se clasifican así: 1) ferrosas o 2) no ferrosas. La categoría de las ferrosas se subdivide en hierro colado y acero fundido.

Aleaciones ferrosas de fundición: hierro colado El hierro fundido es el más importante de todas las aleaciones para fundición (véase la nota histórica: 11.3). El peso en toneladas de las fundiciones hechas con hierro es varias veces el de todos los demás metales combinados. Hay varios tipos de hierro colado: 1) hierro colado gris, 2) hierro nodular, 3) hierro colado blanco, 4) hierro maleable y 5) hierros colados de aleación (véase la sección 6.2.4). Las temperaturas comunes de vertido para el hierro colado son alrededor de 1 400 ºC (2 500 ºF), lo que depende de su composición.

Nota histórica 11.3 *Primeros productos de hierro fundido.*

Durante los primeros siglos que se practicó la fundición, se prefería al bronce y al latón por sobre el hierro como metales para fundir. El hierro era más difícil de fundir, debido a sus temperaturas de fusión más elevadas y a la falta de conocimiento de su metalurgia. Asimismo, había poca demanda de productos de hierro fundido. Todo esto cambió al comenzar los siglos XVI y XVII.

El arte de fundir con arena al hierro llegó a Europa procedente de China, donde se fundía en moldes de arena hacía más de 2 500 años. En 1550, se fundieron en Europa los primeros cañones de hierro. Las balas para estas armas se fabricaron de hierro colado alrededor de 1568. Las armas y sus proyectiles crearon una demanda grande de hierro colado. Pero estos artículos eran para uso militar, no civil. Dos productos de hierro colado que fueron significativos para el público general fueron la estufa y el tubo de agua.

Un producto tan poco espectacular como pueda parecer hoy, la estufa de hierro colado, trajo confort, salud y mejora de las condiciones de vida para mucha gente en Europa y el continente americano. Durante el siglo XVIII, la manufactura de estufas de hierro colado era una de las industrias más grandes y rentables en ambos continentes. El éxito comercial de la fabricación de estufas se debió a la gran demanda del producto, y al arte y tecnología de la fundición de hierro que se habían desarrollado para producirlo.

El tubo de agua de hierro colado fue otro producto que disparó el crecimiento de esa industria. Hasta el advenimiento de los tubos de hierro colado, se habían probado diferentes métodos para llevar agua en forma directa a los hogares y talleres. Incluso tubos de madera huecos (que se rompían rápido), de plomo (demasiado caros) y trincheras abiertas (susceptibles de contaminarse). El desarrollo del proceso de fundir hierro proveyó la capacidad de fabricar secciones de tubo para agua a un costo relativamente bajo, en Francia, al comenzar 1664, y después en otras partes de Europa. Al iniciar el siglo XIX, en Inglaterra se instalaban muchas líneas de tubo de hierro colado para conducir agua y gas. La primera instalación significativa de tubos de agua en Estados Unidos ocurrió en Filadelfia, en 1817, con el empleo de tubería importada de Inglaterra.

Aleaciones ferrosas de fundición: acero Las propiedades mecánicas del acero lo hacen un material atractivo para la ingeniería (véase la sección 6.2.3), y la capacidad de crear formas complejas hace que la fundición sea un proceso llamativo. Sin embargo, las fundidoras que se especializan en acero enfrentan dificultades grandes. En primer lugar, el punto de fusión del acero es considerablemente más alto que el de la mayoría de metales que es común fundir. El rango de solidificación para aceros al bajo carbono (véase la figura 6.4) comienza apenas por debajo de 1 540 ºC (2 800 ºF). Esto significa que la temperatura que se requiere para verter acero es muy alta, cerca de 1 650 ºC (3 000 ºF). A esas temperaturas tan elevadas el acero tiene una química muy reactiva. Se oxida con rapidez, por lo que deben emplearse procedimientos especiales durante la fundición y vertido a fin de aislar al metal derretido del aire. Asimismo, el acero fundido tiene relativamente poca fluidez, y esto limita el diseño de secciones delgadas en componentes fundidos de acero.

Son varias las características de los fundidos de acero que hacen benéfico el esfuerzo de resolver estos problemas. La resistencia a la tensión es mayor que la de la mayoría de metales para fundición, y es de 410 MPa (60 000 lb/in^2), aproximadamente [7]. Los fundidos de acero tienen mejor tenacidad que la mayor parte de otras aleaciones fundidas. Las propiedades de los fundidos de acero son isotrópicas; su resistencia es virtualmente la misma en todas direcciones. Por el contrario, las piezas conformadas mecánicamente (por ejemplo, rolado, forjado) presentan propiedades que varían con la dirección. En función de los requerimientos del producto, puede ser deseable que el comportamiento de un material sea isotrópico. Otra ventaja de los fundidos de acero es la facilidad con que se sueldan. Se sueldan sin que haya pérdida significativa de su resistencia, para reparar el fundido o para fabricar estructuras con otros componentes de acero.

Aleaciones no ferrosas de fundición Los metales no ferrosos para fundición incluyen aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, estaño, zinc, níquel y titanio (véase la sección 6.3). Las ***aleaciones de aluminio*** por lo general se consideran muy susceptibles de fundirse. El punto de fusión del aluminio puro es de 660 ºC (1 220 ºF), por lo que las temperaturas de vertido de las aleaciones fundidas de aluminio son bajas en comparación con el hierro colado y el acero. Sus propiedades las hacen atractivas para los fundidos: poco peso, rango amplio de propiedades de resistencia que se logran por medio de tratamiento térmico y facilidad de maquinado. Las ***aleaciones de magnesio*** son las más ligeras de todos los

metales para fundición. Otras propiedades incluyen resistencia a la corrosión, así como buenas resistencias a peso y rigidez a peso.

Las ***aleaciones de cobre*** incluyen bronce, latón y aluminio-bronce. Las propiedades que los hacen atractivos son la resistencia a la corrosión, apariencia atractiva y buenas cualidades para servir como boquillas. El costo elevado del cobre es una limitación en el uso de sus aleaciones. Las aplicaciones incluyen juntas para tubos, aspas de propelas marinas, componentes de bombas y joyería.

El estaño tiene el punto de fusión más bajo de los metales para fundición. Las ***aleaciones basadas en estaño*** por lo general son fáciles de fundir. Tiene buena resistencia a la corrosión pero mala resistencia mecánica, lo que limita sus aplicaciones a jarras de peltre y productos similares que no requieren mucha resistencia. Las ***aleaciones de zinc*** se emplean comúnmente en la fundición con troquel. El zinc tiene un punto de fusión bajo y buena fluidez, lo que lo hace muy susceptible de ser fundido. Su principal desventaja es que tiene poca resistencia al agrietamiento, por lo que sus fundidos no pueden sujetarse a esfuerzos grandes prolongados.

Las ***aleaciones de níquel*** tienen buena resistencia al calor y a la corrosión, lo que las hace apropiadas para aplicaciones de temperaturas altas tales como motores a chorro y componentes de cohetes, escudos de calor y otros productos similares. Las aleaciones de níquel también tienen un punto de fusión alto y no son fáciles de fundir. Las ***aleaciones de titanio*** para fundición son resistentes a la corrosión y poseen razones elevadas de resistencia a peso. Sin embargo, el titanio tiene un punto de fusión alto, poca fluidez y propensión a oxidarse a temperaturas elevadas. Estas propiedades hacen difícil fundirlo, a él y a sus aleaciones.

11.7 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

Si el diseñador del producto elige a la fundición como el proceso de manufactura principal de cierto componente, entonces deben seguirse ciertos lineamientos para facilitar la producción de la pieza y evitar muchos de los defectos que se enumeran en la sección 11.5. A continuación se presentan algunos de los lineamientos importantes y consideraciones para la fundición.

- ***Sencillez geométrica.*** Aunque la fundición es un proceso que puede usarse para producir piezas de forma compleja, la simplificación del diseño de ésta mejorará su facilidad para fundirse. Evitar complejidades innecesarias simplifica la fabricación del molde, reduce la necesidad de núcleos y mejora la resistencia del fundido.
- ***Esquinas.*** Deben evitarse las esquinas y ángulos agudos, porque son fuentes de concentración de esfuerzos y ocasionan agrietamientos calientes y fisuras en el fundido. Deben diseñarse biseles generosos para las esquinas internas, y las aristas agudas deben suavizarse.
- ***Espesores de sección.*** Los espesores de la sección deben ser uniformes a fin de evitar cavidades por fugas. Las secciones gruesas crean ***puntos calientes*** en el fundido, debido a que un volumen mayor requiere más tiempo para solidificarse y enfriarse. Éstas son ubicaciones probables de las cavidades por fuga. La figura 11.24 ilustra el problema y ofrece algunas soluciones posibles.
- ***Inclinación.*** Las secciones de la pieza que se proyectan en el interior del molde deben tener una inclinación o desviación, como se define en la figura 11.25. En la fundición con moldes desechables, el propósito de esa inclinación es ayudar a extraer del molde la pieza. Debe permitirse desviaciones similares si se emplean núcleos sólidos en el

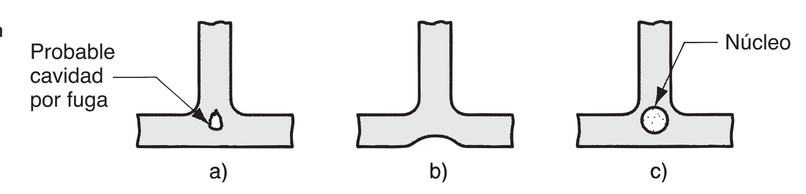


FIGURA 11.24 *a*) Una sección gruesa en la intersección puede dar como resultado una cavidad por fuga. Las soluciones incluyen *b*) el rediseño para disminuir el espesor y *c*) usar un núcleo.

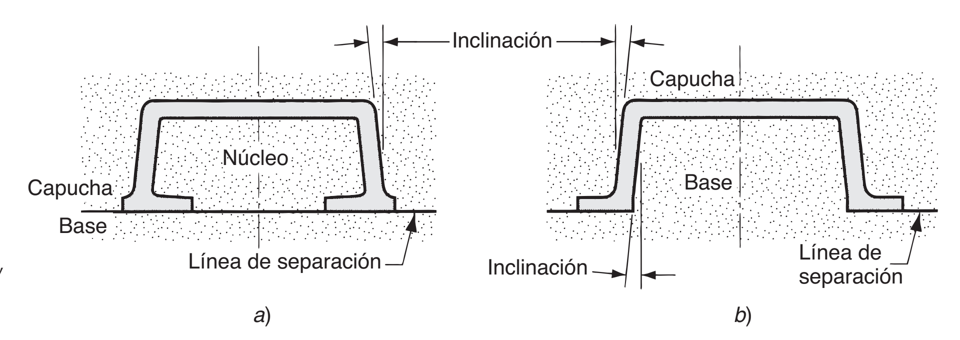


FIGURA 11.25 Cambio del diseño para eliminar la necesidad de utilizar un núcleo; *a*) diseño original y *b*) rediseño.

proceso de fundido. Para la fundición con moldes de arena la inclinación que se requiere necesita ser de sólo 1º, y de 2º a 3º para procesos con moldes permanentes.

- ***Uso de núcleos.*** Ciertos cambios pequeños en el diseño de la pieza reducen la necesidad de utilizar núcleos, como se ilustra en la figura 11.25.
- ***Tolerancias dimensionales.*** Hay diferencias significativas en la exactitud dimensional que puede alcanzarse en los fundidos, lo que depende del proceso que se utilice. En la tabla 11.2 se presenta una recopilación de tolerancias comunes para piezas con diferentes procesos y metales de fundición.
- ***Acabado de las superficies.*** La rugosidad superficial común que se logra en la fundición con arena es de alrededor de 6 μm (250 μ-in). De manera similar, con los moldes de cascarón se obtiene malos acabados, en tanto que los moldes de yeso y la fundición por revestimiento producen valores mucho mejores de rugosidad: 0.75 μm (30 μ-in). Entre los procesos con molde permanente es notable la fundición con troquel debido a los buenos acabados de superficie que produce, alrededor de 1 μm (40 μ-in).
- ***Tolerancias de maquinado.*** En muchos procesos de fundición las tolerancias que pueden alcanzarse son insuficientes para satisfacer las necesidades de funcionamiento en muchas aplicaciones. La fundición con arena es el ejemplo más notable de esta deficiencia. En estos casos, deben maquinarse piezas del fundido para darles las dimensiones requeridas. Casi todos los fundidos con arena deben maquinarse hasta cierto grado a fin de que la pieza sea funcional. Por tanto, en ésta se deja material adicional, llamado ***tolerancia de maquinado***, para maquinar esas superficies donde sea necesario. Las tolerancias comunes de maquinado para fundidos con arena varían entre 1.5 mm y 3 mm (1/16 in y ¼ in).

TABLA 11.2. Tolerancias dimensionales comunes para los diferentes procesos de fundición y metales.

Proceso de fundido	Tamaño de la pieza	Tolerancia mm	Tolerancia in	Proceso de fundido	Tamaño de la pieza	Tolerancia mm	Tolerancia in
Fundición con arena				Molde permanente			
Aluminio[a]	Pequeño	± 0.5	± 0.020	Aluminio[a]	Pequeño	± 0.25	± 0.010
Hierro colado	Pequeño	± 1.0	± 0.040	Hierro colado	Pequeño	± 0.8	± 0.030
	Grande	± 1.5	± 0.060	Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.4	± 0.015
Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.4	± 0.015	Acero	Pequeño	± 0.5	± 0.020
Acero	Pequeño	± 1.3	± 0.050	Fundición con troquel			
	Grande	± 2.0	± 0.080	Aluminio[a]	Pequeño	± 0.12	± 0.005
Moldes en cascarón				Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.12	± 0.005
Aluminio[a]	Pequeño	± 0.25	± 0.010	Revestimiento			
Hierro colado	Pequeño	± 0.5	± 0.020	Aluminio[a]	Pequeño	± 0.12	± 0.005
Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.4	± 0.015	Hierro colado	Pequeño	± 0.25	± 0.010
Acero	Pequeño	± 0.8	± 0.030	Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.12	± 0.005
Molde de yeso	Pequeño	± 0.12	± 0.005	Acero	Pequeño	± 0.25	± 0.010
	Grande	± 0.4	± 0.015				

Recopilada de las referencias [5], [12] y otras.

[a] Los valores para el aluminio también se aplican para el magnesio.

REFERENCIAS

[1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L. ***Manufacturing Processes.*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.
[2] Beeley, P. R. ***Foundry Technology.*** Newnes-Butterworths, Londres, 1972.
[3] Datsko, J. ***Material Properties and Manufacturing Processes.*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1966.
[4] Flinn, R. A. ***Fundamentals of Metal Casting.*** American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaine, Ill., 1987.
[5] Heine, R. W., Loper, Jr., C R. y Rosenthal, C. ***Principles of Metal Casting.*** 2a. ed. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1967.
[6] Kotzin, E. L., ***Metalcasting & Molding Processes.*** American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Ill., 1981.
[7] ***Metals Handbook.*** 9a. ed., vol. 15: ***Casting.*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1988.
[8] Mikelonis, P. J. (ed.). ***Foundry Technology.*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982.
[9] Mueller, B. "Investment Casting Trends," ***Advanced Materials & Processes,*** marzo de 2005, pp. 30-32.
[10] Niebel, B. W., Draper, A. B., Wysk, R. A. ***Modern Manufacturing Processes Engineering.*** McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1989.
[11] Simpson, B. L. ***History of the Metalcasting Industry.*** American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Ill., 1997.
[12] Wick, C., Benedict, J. T. y Veilleux, R. F. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook.*** 4a. ed. Vol. II: ***Forming.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984, Ch. 16.

PREGUNTAS DE REPASO

11.1. Mencione las dos categorías básicas de los procesos de fundición.

11.2. Existen varios tipos de modelos que se usan en el moldeo con arena. ¿Cuál es la diferencia entre un modelo deslizante y otro de placa ajustada?

11.3. ¿Qué es una corona?

11.4. ¿Qué propiedades determinan la calidad de un molde con arena para la fundición con ésta?

11.5. ¿Cuál es el proceso de Antioquia?

11.6. ¿Cuál es la diferencia entre la fundición con un molde permanente al vacío y el moldeo al vacío?

11.7. ¿Cuáles son los metales más comunes que se emplean en la fundición con troquel?

11.8. ¿Cuáles máquinas de fundición con troquel tienen por lo general una tasa de producción más elevada, las de cámara fría o las de cámara caliente, y por qué?

11.9. ¿Qué es la rebaba, en la fundición con troquel?

11.10. ¿Cuál es la diferencia entre la fundición centrífuga real y la semicentrífuga?

11.11. ¿Qué es una cubilote?

11.12. ¿Cuáles son algunas de las operaciones que se requieren en la fundición con arena, después de que el fundido se retira del molde?

11.13. ¿Cuáles son algunos de los defectos generales que se encuentran en los procesos de fundición? Mencione y describa tres, en forma breve.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 27 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

11.1. ¿Cuál de los procesos de fundición siguientes es el que se usa más?: *a*) fundición centrífuga, *b*) fundición con troquel, *c*) fundición por revestimiento, *d*) fundición con arena o *e*) fundición en cascarón.

11.2. En la fundición con arena, ¿el tamaño volumétrico del modelo es *a*) mayor que, *b*) del mismo tamaño que o *c*) más pequeño que, la pieza fundida?

11.3. ¿Cuál de las siguientes composiciones tiene la arena de sílice?: *a*) Al_2O_3, *b*) SiO, *c*) SiO_2 o *d*) $SiSO_4$.

11.4. ¿Por cuál de las razones siguientes recibe su nombre un molde verde? *a*) el molde es de color verde, *b*) la humedad que contiene el molde, *c*) el molde está curado o *d*) el molde está seco.

11.5. Dado que W_m = peso del metal fundido desplazado por un núcleo, y W_c = peso del núcleo, cuál de las siguientes es la fuerza de flotación: *a*) fuerza hacia abajo = $W_m + W_c$, *b*) fuerza hacia abajo = $W_m - W_c$, *c*) fuerza hacia arriba = $W_m + W_c$, *d*) fuerza hacia arriba = $W_m - W_c$.

11.6. ¿Cuáles de los siguientes procesos de fundición son operaciones con moldes desechables? (hay cuatro respuestas correctas): *a*) fundición centrífuga, *b*) fundición con troquel, *c*) fundición por revestimiento, *d*) fundición a baja presión, *e*) fundición con arena, *f*) moldeo en cascarón, *g*) fundición en hueco y *h*) moldeo al vacío.

11.7. ¿Cuál de los siguientes describe mejor al moldeo en cascarón?: *a*) operación de fundición en la que el metal derretido

se vierte después de que se ha solidificado una concha delgada en el molde, *b*) proceso de fundición en el que el molde es un cascarón delgado de arena aglutinada por una resina termofija, *c*) operación de fundición con arena en la que el modelo es un cascarón en vez de una forma sólida o *d*) operación de fundición que se emplea para fabricar conchas marinas artificiales.

11.8. ¿Con cuál de los nombres siguientes se conoce también a la fundición por revestimiento?: *a*) moldeo de recuperación rápida, *b*) proceso de molde completo, *c*) proceso de espuma perdida, *d*) proceso de modelo perdido o *e*) proceso de cera perdida.

11.9. En la fundición con moldes de yeso, ¿con cuál de los materiales siguientes está hecho el molde?: *a*) Al_2O_3, *b*) $CaSO_4–H_2O$, *c*) SiC, *d*) SiO_2.

11.10. ¿Cuál de los siguientes califica como un proceso de fundición de precisión? (dos respuestas correctas): *a*) fundición de lingote, *b*) fundición por revestimiento, *c*) fundición con molde de yeso, *d*) fundición en arena y *e*) moldeo en cascarón.

11.11. ¿Cuáles de los procesos de fundición siguientes son operaciones con molde permanente? (tres respuestas correctas): *a*) fundición centrífuga, *b*) fundición con troquel, *c*) proceso de poliestireno expandido, *d*) fundición con arena, *e*) moldeo con concha, *f*) fundición en hueco y *g*) moldeo al vacío.

11.12. ¿Cuál de los metales siguientes sería común emplear en la fundición con troquel? (tres respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) hierro colado, *c*) acero, *d*) estaño, *e*) tungsteno y *f*) zinc.

11.13. ¿Cuáles de las siguientes son ventajas que tiene la fundición con troquel sobre la fundición con arena? (cuatro respuestas mejores): *a*) mejor acabado de la superficie, *b*) tolerancias más estrechas, *c*) metales con temperatura de fusión más elevada, *d*) tasas de producción más altas, *e*) es posible fundir piezas más grandes y *f*) el molde puede volver a usarse.

11.14. ¿Los cubilotes son hornos que se emplean para fundir a cuál de los metales siguientes? (una respuesta es la mejor): *a*) aluminio, *b*) hierro colado, *c*) acero o *d*) zinc.

11.15. ¿Cuál de los defectos siguientes de la fundición corresponde a un vacío, *a*) quedan atrapados en el fundido glóbulos de metal, *b*) el metal no se vierte en forma apropiada en el bebedero, *c*) el metal se solidifica antes de llenar la cavidad, *d*) microporosidad y *e*) formación de un "rechupe"?

11.16. ¿Cuál de los siguientes metales de fundición es el de mayor importancia comercial?: *a*) el aluminio y sus aleaciones, *b*) bronce, *c*) hierro colado, *d*) acero fundido o *e*) aleaciones de zinc.

PROBLEMAS

Fuerza de flotación

11.1. Un fundido de aleación de aluminio-cobre se fabrica con un molde de arena que emplea un núcleo de arena que pesa 20 kg. Determine la fuerza de flotación, en newtons, que tiende a elevar al núcleo durante el vertido.

11.2. Un núcleo de arena se localiza dentro de una cavidad de un molde que tiene un volumen de 157.0 in^3. Se emplea para fundir la carcasa de hierro de una bomba. Calcule la fuerza de flotación que tenderá a levantar al núcleo durante el vertido.

11.3. Se emplean comprimidos para dar apoyo a un núcleo de arena que está en la cavidad de un molde del mismo material. El diseño de los comprimidos y la manera en que se colocan en la superficie de la cavidad del molde permite que cada uno de ellos soporte una fuerza de 10 libras. Se colocan varios comprimidos debajo del núcleo para darle apoyo antes de verter; y varios se sitúan arriba de él para oponerse a la fuerza de flotación durante el vertido. Si el volumen del núcleo es de 325 in^3, y el metal que se vierte es latón, determine el número mínimo de comprimidos que debe colocarse *a*) abajo del núcleo, *b*) arriba del núcleo.

11.4. Un núcleo de arena que se usa para conformar las superficies internas de un fundido de acero experimenta una fuerza de flotación de 23 kg. El volumen de la cavidad del molde que forma la superficie exterior del fundido es de 5 000 cm^3. ¿Cuál es el peso del fundido final? Ignore las consideraciones acerca de las contracciones.

Fundición centrífuga

11.5. Una operación de fundición centrífuga real horizontal va a emplearse para fabricar tubería de cobre. Las longitudes serán de 1.5 m, con diámetro exterior de 15.0 cm y con diámetro interior de 12.5 cm. Si la velocidad rotacional del tubo es de 1 000 rev/min, determine el factor G.

11.6. Una operación de fundición centrífuga real se llevará a cabo con una configuración horizontal, para fabricar secciones de tubos de hierro. Las secciones tendrán una longitud de 42.0 in, el diámetro exterior es de 8.0 in y el espesor de la pared es de 0.50 in. Si la velocidad rotacional del tubo es de 500 rev/min, determine el factor G. ¿Es probable que la operación vaya a tener éxito?

11.7. Un proceso de fundición centrífuga real horizontal se emplea para fabricar boquillas de latón de las dimensiones siguientes: longitud de 10 cm, diámetro exterior de 15 cm y diámetro interior de 12 cm. *a*) Determine la velocidad rotacional que se requiere a fin de obtener un factor G de 70. *b*) Cuando opera a esta velocidad, ¿cuál es la fuerza centrífuga por metro cuadrado (Pa) que el metal fundido impone sobre la pared interior del molde?

11.8. Una operación de fundición centrífuga real se lleva a cabo en forma horizontal para fabricar secciones de tubo de cobre de diámetro grande. Los tubos tienen una longitud de 1.0 m, diámetro de 0.25 m y espesor de pared de 15 mm. *a*) Si la velocidad de rotación del tubo es de 700 rev/min, determine el factor G sobre el metal derretido. *b*) ¿La velocidad de rotación es suficiente para evitar la "lluvia"?

c) ¿Qué volumen de metal fundido debe verterse en el molde para hacer el fundido, si se toman en cuenta las pérdidas por solidificación y la contracción después de la solidificación?

11.9. Si se realizara una operación de fundición centrífuga real en una estación espacial que circula alrededor de la Tierra, ¿cómo afectaría al proceso la falta de peso?

11.10 Se emplea un proceso de fundición centrífuga real horizontal para hacer anillos de aluminio con las dimensiones siguientes: longitud de 5 cm, diámetro exterior de 65 cm y diámetro interior de 60 cm. *a*) Determine la velocidad rotacional que dará un factor G de 60. *b*) Suponga que el anillo estuviera hecho de acero en vez de aluminio. Si en la operación de fundido del acero se empleara la velocidad rotacional que se calculó en el inciso *a*), determine el factor G y *c*) la fuerza centrífuga por metro cuadrado (Pa) sobre la pared del molde. *d*) ¿Esta velocidad rotacional daría como resultado una operación exitosa?

11.11. Para el anillo de acero del problema anterior, 11.10b), determine el volumen de metal fundido que debe verterse al molde, dado que la pérdida de líquido es de 0.5% y las de solidificación y contracción sólida después de la solidificación pueden determinarse con la tabla 10.1.

11.12. Se usa un proceso de fundición centrífuga real horizontal para fabricar tubo de plomo para plantas químicas. El tubo tiene una longitud de 0.5 m, diámetro exterior de 70 mm y espesor de pared de 6.0 mm. Determine la velocidad de rotación que dará un factor G de 60.

11.13. Se emplea un proceso de fundición centrífuga real vertical para hacer secciones de tubo con longitud de 10.0 in y diámetro exterior de 6.0 in. El diámetro interior del tubo es de 5.5 in en la parte superior y 5.0 in en la inferior. ¿A qué velocidad debe girar el tubo durante la operación a fin de que se cumplan las especificaciones.

11.14. Un proceso de fundición centrífuga real vertical se emplea para producir boquillas que miden 200 mm de largo y 200 mm de diámetro exterior. Si la velocidad rotacional durante la solidificación es de 500 rpm, determine el diámetro interior en la parte superior de la boquilla si el diámetro interior en la base es de 150 mm.

11.15. Se usa un proceso de fundición centrífuga real vertical para hacer tubos de latón que miden 15.0 in de largo y cuyo diámetro exterior es de 8.0 in. Si la velocidad rotacional durante la solidificación es de 1 000 rpm, determine los diámetros interiores en las partes superior e inferior del tubo si el peso total del fundido final es de 75.0 libras.

Defectos y consideraciones de diseño

11.16. La carcasa de cierto producto de maquinaria está hecho con dos componentes, ambos fundidos de aluminio. El componente más grande tiene la forma de lavabo y el segundo es una cubierta plana que se adjunta al primero para crear un espacio cerrado para las piezas de la maquinaria. Se utiliza fundición con arena para producir los dos fundidos, los cuales están llenos de defectos en forma de vacíos y cierres fríos. El supervisor se queja de que las piezas son demasiado delgadas y afirma que ésta es la razón de los defectos. Sin embargo, se sabe que en otras fundidoras se elaboran con éxito los mismos componentes. ¿Qué otra explicación podría haber para los defectos?

11.17. Un fundido en arena, de acero, grande, presenta los signos característicos del defecto de penetración, superficie que consiste en una mezcla de arena y metal. *a*) ¿Qué medidas pueden tomarse para corregir el defecto? *b*) ¿Qué otros defectos posibles podrían resultar si se implantara cada una de esas medidas?

12 TRABAJO DEL VIDRIO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los productos de vidrio se manufacturan comercialmente en una variedad casi ilimitada de formas. Muchos se producen en cantidades muy grandes, como los focos, botellas para bebidas y vidrio para ventanas. Otros, como los lentes de los telescopios gigantes, se fabrican en forma individual.

El vidrio es uno de tres tipos básicos de materiales cerámicos (véase el capítulo 7). Lo distingue su estructura no cristalina (vítrea), mientras que los demás materiales cerámicos la tienen cristalina. Los métodos por los que el vidrio es convertido en productos útiles son muy distintos de aquellos que se emplean para los otros tipos. En el trabajo del vidrio el material principal de inicio es el sílice (SiO_2); por lo general, éste se combina con otros óxidos cerámicos que forman vidrios. El material inicial se calienta para transformarlo de un sólido duro en un líquido viscoso; luego se le conforma a la forma que se desea mientras se encuentra en esa condición fluida. Cuando se enfría y endurece, el material permanece en el estado vítreo en lugar de cristalizarse.

La secuencia común del proceso de trabajar el vidrio consiste en las etapas que se ilustran en la figura 12.1. La conformación se lleva a cabo con varios procesos, que incluyen la fundición, prensado y soplado (para producir botellas y otros contenedores), y el rolado (para hacer vidrio plano). Para ciertos productos se requiere una etapa de acabado.

12.1 PREPARACIÓN Y FUNDICIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

El componente principal de casi todos los vidrios es el sílice (SiO_2), cuya fuente principal es el cuarzo de la arena natural. La arena debe lavarse y clasificarse. El lavado quita las

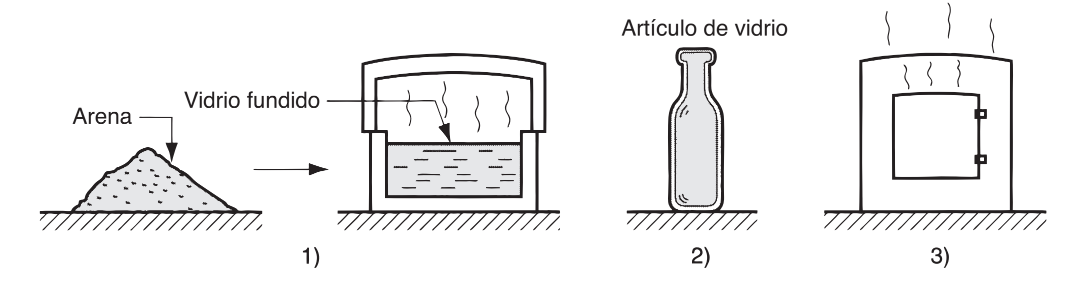


FIGURA 12.1 Secuencia común del proceso de trabajar el vidrio: 1) preparación y fundición de la materia prima, 2) conformación y 3) tratamiento térmico.

impurezas tales como la arcilla y ciertos materiales que teñirían al vidrio con un color indeseable. ***Clasificar*** la arena significa agrupar los granos de acuerdo con su tamaño. El tamaño más preferible de las partículas para hacer vidrio está en el rango de 0.1 a 0.6 mm (0.004 a 0.025 in) [3]. Los otros varios componentes, tales como ceniza de sodio (fuente del Na_2O), caliza (fuente del CaO), óxido de aluminio, potasa (fuente del K_2O) y otros minerales, se agregan en proporciones adecuadas para obtener la composición deseada. Generalmente, la mezcla se hace por lotes, en cantidades compatibles con las capacidades de los hornos de fundición de que se disponga.

En la práctica moderna, por lo general se agrega vidrio reciclado a la mezcla. Además de proteger el ambiente, el vidrio reciclado facilita la fundición. En función de la cantidad de desperdicios de vidrio disponibles y las especificaciones de la composición final, la proporción de vidrio reciclado puede alcanzar hasta 100%.

El lote de los materiales de inicio por fundir se conocen como ***carga*** y el procedimiento de cargarlo en el horno de fundición se denomina ***cargado*** del horno. Los hornos para fundir vidrio se dividen en los tipos siguientes [3]: 1) ***hornos de vasija***, vasijas de cerámica de capacidad limitada en la que ocurre la fundición calentando sus paredes; 2) ***tanques superficiales***, recipientes cerámicos de capacidad más grande para la producción de lotes, en los que el calentamiento se realiza con la quema de combustibles sobre la carga; 3) ***hornos de tanque continuo***, hornos de tanque largo en los que los materiales se alimentan por un extremo y se funden conforme se mueven hacia el otro, donde se extrae el vidrio fundido para producciones elevadas; y 4) ***hornos eléctricos*** de diseños varios para un rango amplio de tasas de producción.

La fundición de vidrio por lo general implica temperaturas alrededor de 1 500 ºC a 1 600 ºC (2 700 ºF a 2 900 ºF). El ciclo de fundición para una carga común requiere de 24 a 48 horas. Éste es el tiempo necesario para que todos los granos de arena se conviertan en un líquido claro a fin de que se refine el vidrio fundido y se enfríe a la temperatura adecuada para el trabajo. El vidrio fundido es un líquido viscoso, su viscosidad se relaciona en forma inversa con la temperatura. Debido a que la operación de darle forma sigue de inmediato al ciclo de fundición, la temperatura a la que el vidrio se extrae del horno depende de la viscosidad que se requiera para el proceso que sigue.

12.2 LOS PROCESOS DE CONFORMACIÓN EN EL TRABAJO DEL VIDRIO

Las categorías principales de productos de vidrio se identificaron (véase la sección 7.4.2) como vidrio de ventanas, contenedores, focos, vidrio para laboratorios, fibras de vidrio y vidrio óptico. A pesar de la variedad de esta lista, los procesos de conformación para fabricar estos productos se agrupan sólo en tres categorías: 1) procesos discretos para artículos de vidrio, que incluye botellas, focos y otros productos individuales; 2) procesos continuos par fabricar vidrio plano (hojas y placas de vidrio para ventanas) y tubería (para artículos de laboratorio y lámparas fluorescentes); y 3) procesos para la producción de fibras para aislantes, materiales compuestos de fibra de vidrio y fibra óptica.

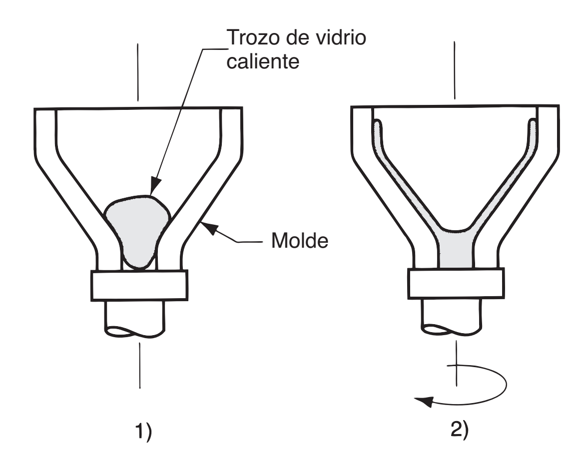


FIGURA 12.2 Giro de piezas de vidrio en forma de embudo: 1) Trozo de vidrio que se coloca en el molde y 2) rotación del molde para hacer que el vidrio fundido se distribuya sobre su superficie.

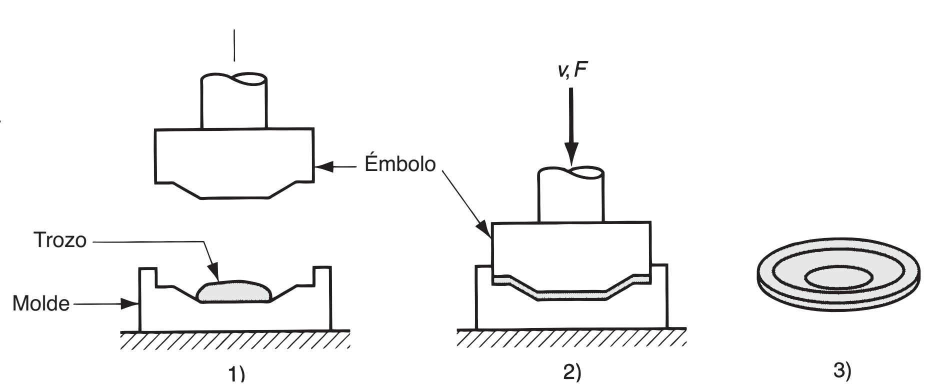
12.2.1 Conformación de artículos de vidrio

Los métodos antiguos de trabajar el vidrio a mano, tales como el soplado, están descritos en forma breve en la nota histórica 7.3. Los métodos artesanales aún se emplean para fabricar cantidades pequeñas de artículos de vidrio de mucho valor. La mayoría de procesos estudiados en esta sección son tecnologías muy mecanizadas para producir cantidades grandes de piezas discretas tales como frascos, botellas y focos.

Girado El girado del vidrio es similar a la ***fundición centrífuga*** de los metales, y también se conoce con ese nombre en el contexto del trabajo del vidrio. Se usa para producir componentes en forma de embudo tales como las secciones posteriores de los tubos de rayos catódicos para televisiones y monitores de computadora. En la figura 12.2 se ilustra el arreglo. Se coloca un trozo de vidrio fundido en un molde cónico hecho de acero. Se hace girar el molde de modo que la fuerza centrífuga haga que el vidrio fluya hacia arriba y se distribuya sobre la superficie del molde. Después se ensambla la placa frontal (es decir, la pantalla frontal) con el embudo por medio del empleo de un vidrio sellador de punto de fusión bajo.

Prensado Éste es un proceso muy utilizado para la producción en masa de piezas de vidrio tales como trastos, moldes de pastelería, lentes de lámparas, pantallas de tubos de televisión y artículos similares que son relativamente planos. El proceso se ilustra y describe en la figura 12.3. En esta secuencia de producción, las cantidades grandes de la mayoría de productos prensados justifican un nivel alto de automatización.

FIGURA 12.3 Prensado de una pieza plana de vidrio: 1) se pone en el molde un trozo procedente del horno, 2) un émbolo presiona para darle forma y 3) se retira el émbolo y el producto terminado se extrae. Los símbolos *v* y *f* significan el movimiento (*v* = velocidad) y la fuerza aplicada, respectivamente.



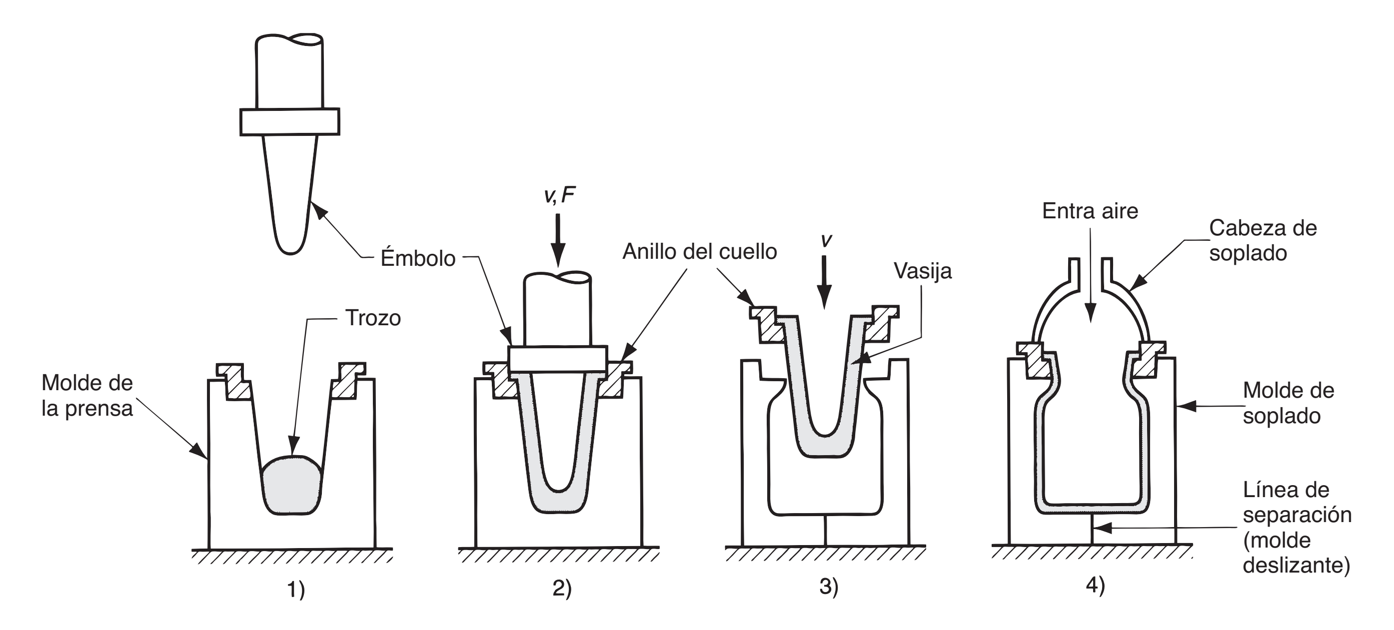


FIGURA 12.4 Secuencia de formado de prensado y soplado: 1) se coloca un trozo fundido en la cavidad del molde, 2) se presiona para formar una ***vasija***, 3) la vasija formada parcialmente se transfiere sostenida del cuello por un anillo hacia el molde de soplado y 4) se sopla para que adquiera su forma final. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento (*v* = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

Soplado Varias secuencias de formado incluyen una o más etapas de soplado. En lugar de ser una operación manual, el soplado se ejecuta en equipo muy automatizado. Las dos secuencias aquí descritas son para los métodos de prensar y soplar, y de soplar y soplar.

Como el nombre lo indica, el método de ***prensar y soplar*** es una operación de prensado seguida de otra de soplado, como se ilustra en la figura 12.4. El proceso se adapta a la producción de contenedores de boca ancha. En la operación de soplado se emplea un molde deslizante para la etapa de retiro.

El método de ***soplar y soplar*** se utiliza para producir botellas de boca estrecha. La secuencia es similar a la precedente, excepto que se usan dos (o más) operaciones de soplado en vez de sólo prensar y soplar. Hay variantes de este proceso, lo que depende de la forma del producto, y una de las secuencias posibles se muestra en la figura 12.5. En ocasiones se requiere volver a calentar entre las etapas de soplado. A veces se emplean moldes duplicados y triplicados junto con sus respectivos alimentadores de trozos para incrementar las tasas de producción. Los métodos de prensar y soplar, y de soplar y soplar se usan para fabricar frascos, botellas para bebidas, focos, recipientes y otros productos con formas parecidas.

Fundición Si el vidrio fundido tiene fluidez suficiente, puede verterse en un molde. Con este método se fabrican objetos relativamente macizos, tales como lentes y espejos astronómicos. Estas piezas deben enfriarse muy despacio para evitar tensiones internas y un posible agrietamiento debido a los gradientes de temperatura que se induciría en el vidrio si no se hiciera así. Después de enfriarse y solidificarse, la pieza debe terminarse por medio de bruñir y pulir. La fundición no se usa en el trabajo del vidrio, excepto para estas clases especiales de trabajos. El enfriamiento y agrietamiento no son los únicos problemas, sino que también el vidrio fundido es relativamente viscoso a las temperaturas normales de trabajo, y no fluye tan bien como los metales fundidos o los termoplásticos calientes a través de orificios pequeños o en secciones delgadas. Los lentes pequeños se hacen generalmente por medio de prensado, como se acaba de estudiar.

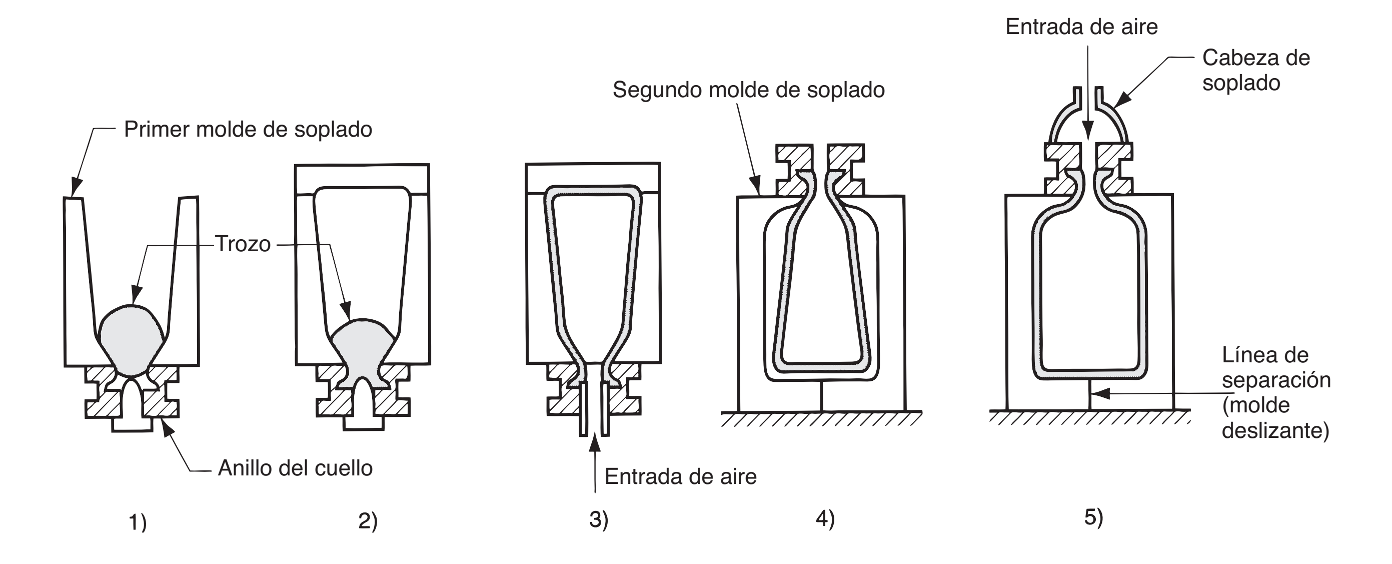


FIGURA 12.5 Secuencia de conformación por medio de soplar y soplar: 1) se introduce un trozo en la cavidad del molde invertido, 2) se cubre el molde, 3) primera etapa del soplado, 4) la pieza formada parcialmente se reorienta y transfiere a un segundo molde de soplado y 5) se sopla para dar la forma final.

12.2.2 Conformación de vidrio plano y tubular

Aquí se describen dos métodos para fabricar vidrio plano y uno para producir tubos. Se trata de procesos continuos, con los que se elaboran secciones largas de vidrio plano para ventana o tubos de vidrio, que después se cortan al tamaño y longitudes apropiados. Se trata de tecnologías modernas, en comparación con el método antiguo que se describe en la nota histórica 12.1.

Nota histórica 12.1 *Métodos antiguos de fabricación de vidrio plano* [7].

Durante muchos siglos se ha empleado el vidrio en las ventanas de los edificios. El proceso más antiguo para fabricar vidrio plano para ventanas es el soplado a mano. El procedimiento consistía en lo siguiente: 1) se soplaba un globo de vidrio con un tubo; 2) una parte del globo estaba construida para adherirse al extremo de un "puntero", barra de metal empleada por los sopladores, y luego se separaba; y 3) después de volver a calentar el vidrio, se hacía girar el puntero con velocidad suficiente para que la fuerza centrífuga transformara al globo abierto en un disco plano. El disco, cuyo tamaño máximo posible era de sólo 1 m (3 ft), se cortaba posteriormente en piezas pequeñas para usarlas en las ventanas.

En el centro del disco, donde el vidrio estaba adherido con el puntero durante la tercera etapa del proceso, tendía a formarse un bulto con apariencia de corona. De aquí se derivó el nombre de "vidrio crown" (vidrio corona). Con este método se obtenían lentes para espectáculos. Hoy día, aún se emplea dicho nombre para ciertos tipos de vidrio óptico y oftálmico, aun cuando el método antiguo ha sido remplazado por la tecnología moderna de producción.

Rolado de placas planas Como se aprecia en la figura 12.6, es posible producir vidrio de placas planas por medio de rolado. El vidrio de inicio, en la condición plástica apropiada que tiene al salir del horno, se comprime con rodillos opuestos cuya separación determina el espesor de la hoja. La operación de rolado por lo general se lleva a cabo de modo que el vidrio plano se mueve directamente hacia un horno de templado. La hoja de vidrio rolada debe tallarse y pulirse en forma posterior, para darle paralelismo y lisura.

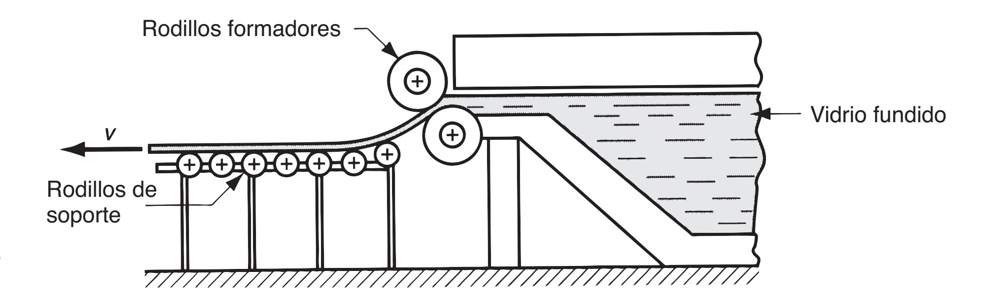


FIGURA 12.6 Rolado de vidrio plano.

Proceso de flotación Este proceso, creado a finales de la década de 1950, tiene la ventaja sobre métodos tales como el rolado, de que con él se obtienen superficies más lisas que no necesitan de un acabado posterior. En el ***proceso de flotación***, que se ilustra en la figura 12.7, el vidrio fluye directamente desde el horno de fundición a la superficie de un baño de estaño derretido. El vidrio muy fluido se distribuye en forma pareja por la superficie, lo que le da un espesor y suavidad uniformes. Después de avanzar hacia una región más fría del baño, el vidrio se endurece y se mueve hacia un horno de templado, después de lo cual se corta al tamaño necesario.

Estirado de tubos de vidrio La tubería de vidrio se manufactura medianre un proceso de estirado conocido como ***proceso Danner***, que se ilustra en la figura 12.8. El vidrio fundido fluye alrededor de un mandril hueco rotatorio por el que se sopla aire mientras el vidrio pasa. La temperatura del aire y su gasto volumétrico, así como la velocidad de paso, determinan el diámetro y espesor de la pared de la sección transversal tubular. Durante el endurecimiento, el tubo de vidrio recibe apoyo de una serie de rodillos que se extienden por 30 m (100 ft) más allá del mandril. Luego, el tubo continuo se corta a longitudes estándar. Los productos de vidrio tubular incluyen equipo para laboratorios, lámparas fluorescentes y termómetros.

12.2.3 Formación de fibras de vidrio

Las fibras de vidrio se utilizan en aplicaciones que van desde lana aislante a líneas de comunicación de fibra óptica (véase la sección 7.4.2). Los productos de fibra de vidrio se dividen en dos categorías [6]: 1) vidrio fibroso para aislamientos térmico y acústico, y filtración de aire, en el que las fibras se encuentran en la condición aleatoria parecida a la de la lana; y 2) filamentos continuos, largos, apropiados para plásticos reforzados con fibras, hilos y telas, y fibras ópticas. Para ambas categorías se emplean métodos de producción distintos; a continuación se describen los dos métodos, que representan cada categoría de productos, respectivamente.

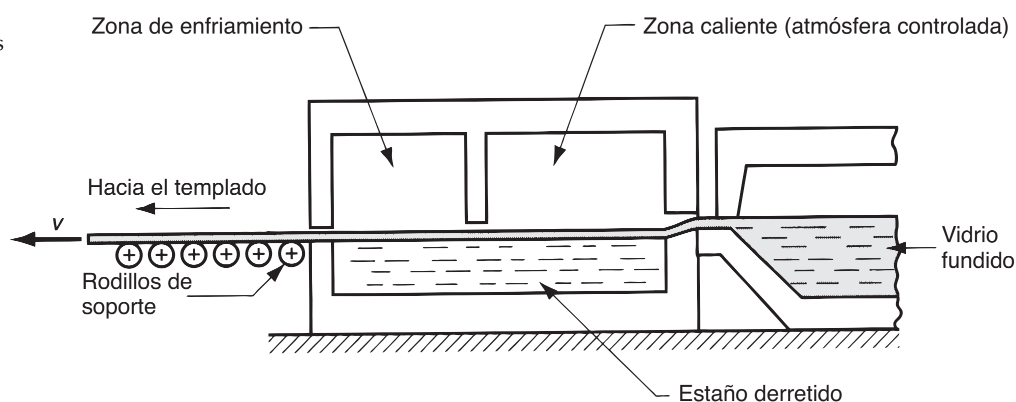


FIGURA 12.7 Proceso de flotación para producir hojas de vidrio.

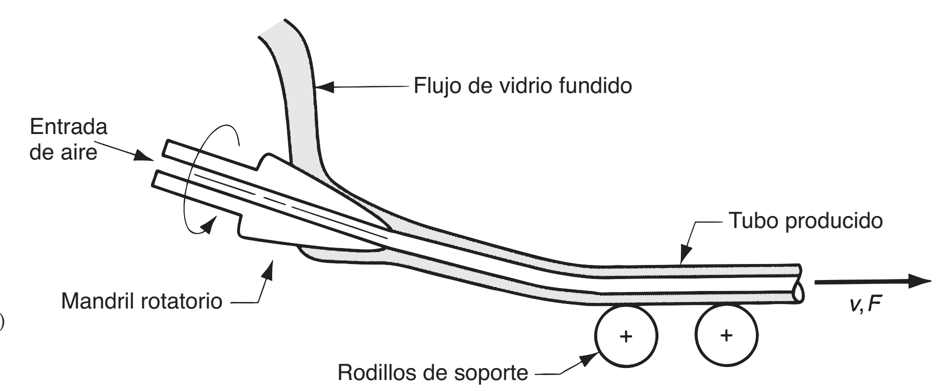


FIGURA 12.8 Estirado de tubos de vidrio con el proceso Danner. Los símbolos v y F indican movimiento (v = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

Rocío centrífugo En un proceso común para elaborar lana de vidrio, el vidrio fluye en estado fundido hacia un contenedor rotatorio con muchos orificios pequeños alrededor de su periferia. La fuerza centrífuga ocasiona que el vidrio pase a través de los agujeros para convertirse en una masa fibrosa apropiada para el aislamiento térmico y acústico.

Obtención de filamentos continuos Con este proceso, que se ilustra en la figura 12.9, se producen fibras de vidrio continuas de diámetro pequeño (el límite inferior del tamaño es alrededor de 0.0025 mm, 0.0001 in) estirándolas (empujándolas) en bandas de vidrio fundido a través de hoyos pequeños en una placa caliente de aleación de platino. La placa tiene varios cientos de agujeros y cada uno origina una fibra. Las fibras individuales se reúnen en una banda enrollándoseles en un carrete. Antes de enrollar las fibras, se recubren con diversos productos químicos para lubricarlas y protegerlas. No son raras las velocidades de estirado con alrededor de 50 m/s (10 000 ft/min) o más.

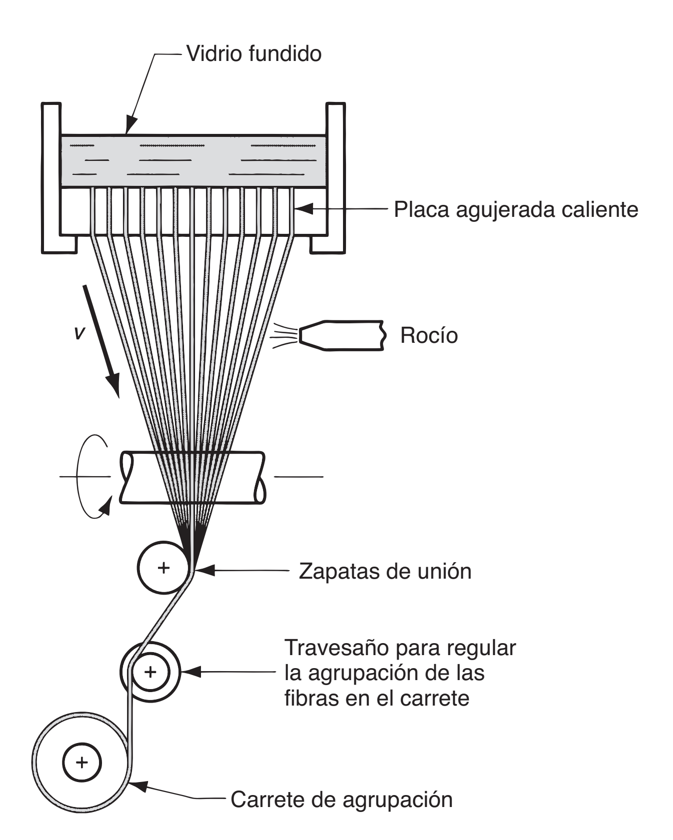


FIGURA 12.9 Obtención de fibras de vidrio continuas.

12.3 TRATAMIENTO TÉRMICO Y ACABADO

El tratamiento térmico del producto de vidrio es la tercera etapa de la secuencia del trabajo del vidrio. Para ciertos productos, se llevan a cabo operaciones adicionales de acabado.

12.3.1 Tratamiento térmico

En la sección 7.4.3 se estudiaron los vidrios cerámicos. Este material único se fabrica con un tratamiento especial a base de calor que transforma la mayor parte del estado vítreo en un cerámico policristalino. Otros tratamientos térmicos que se le practican al vidrio generan cambios menos notables en lo tecnológico, pero quizá más importantes desde un punto de vista comercial; ejemplos de lo anterior son el recocido y el templado.

Recocido Una vez formados, los productos de vidrio por lo general tienen esfuerzos internos perjudiciales, que disminuyen su resistencia. El recocido se lleva a cabo para liberar dichos esfuerzos; por tanto, en el trabajo del vidrio el tratamiento tiene la misma función que en el del metal. El ***recocido*** involucra calentar el vidrio a temperatura elevada y mantenerlo así durante cierto periodo para eliminar los esfuerzos y gradientes de temperatura, para luego enfriarlo despacio a fin de eliminar la formación de esfuerzos, y seguir con un enfriamiento más rápido a temperatura ambiente. Las temperaturas comunes del recocido son alrededor de 500 °C (900 °F). El lapso que se mantiene el producto a esa temperatura, así como las tasas de calentamiento y enfriamiento del ciclo, dependen del espesor del vidrio; la regla habitual es que el tiempo requerido para el recocido varía con el cuadrado del espesor.

El recocido en las fábricas modernas de vidrio se lleva a cabo en hornos parecidos a túneles, llamados ***lehrs***, en los que los productos fluyen con lentitud a través de la cámara caliente sobre bandas. Los quemadores se ubican sólo en el extremo frontal de la cámara, de modo que el vidrio experimente el ciclo de calentamiento y enfriamiento que se requiere.

Vidrio templado y productos relacionados En los productos de vidrio es posible poner en práctica un patrón de esfuerzos internos benéfico, por medio de un tratamiento térmico que se conoce como ***templado***, y el material que resulta recibe el nombre de ***vidrio templado***. Igual que en el tratamiento del acero endurecido, el templado incrementa la tenacidad del vidrio. El proceso consiste en el calentamiento del vidrio a una temperatura algo superior de la del recocido, y en el rango plástico, seguido del enfriamiento rápido de las superficies, por lo general con chorros de aire. Cuando las superficies se enfrían, se contraen y endurecen mientras que el interior aún está en estado plástico y es moldeable. Conforme el vidrio interno se enfría con lentitud, se contrae, lo que sujeta a compresión las superficies duras. Como otros cerámicos, el vidrio es mucho más fuerte cuando se le sujeta a esfuerzos de compresión que a los de tensión. En consecuencia, el vidrio templado es mucho más resistente a las ralladuras y roturas debido a los esfuerzos de compresión sobre sus superficies. Las aplicaciones de esto incluyen vidrios para ventanas de edificios altos, puertas hechas por completo de vidrio, vidrios de seguridad y otros productos que requieren vidrio tenaz.

Cuando el vidrio templado falla, lo hace rompiéndose en fragmentos pequeños muy numerosos que hacen menos probable que alguien se corte con ellos que con vidrio de ventanas convencional (recocido). Es interesante que los parabrisas de automóviles no estén hechos de vidrio templado, debido al peligro que entraña esa fragmentación para el conductor. En vez de ello se utiliza vidrio convencional; sin embargo, se fabrica con dos piezas de vidrio a ambos lados de una hoja de polímero duro. Debido a esto se fractura como ***vidrio laminado***, las esquirlas de vidrio quedan retenidas por la hoja de polímero y el parabrisas permanece relativamente transparente.

12.3.2 Acabado

En ocasiones se requieren operaciones de acabado para los productos de vidrio. Estas operaciones secundarias incluyen esmerilado, pulido y corte. Cuando se producen hojas

de vidrio por medio de extracción y rolado, los lados opuestos no son necesariamente paralelos, y las superficies contienen defectos y ralladuras ocasionadas por el uso de herramientas duras sobre el vidrio suave. Las hojas de vidrio deben lijarse y pulirse para la mayoría de aplicaciones comerciales. En las operaciones de prensar y soplar, en las que se emplean troqueles deslizantes, es frecuente que se requiera quitar las marcas de costura del producto contenedor.

En procesos continuos del trabajo del vidrio, tales como la producción de placas y tubos, las secciones continuas deben cortarse en elementos más pequeños. Esto se lleva a cabo por medio de marcar el vidrio con una rueda cortadora o diamante cortador para después romper la sección a lo largo de la línea de marca. El corte se hace por lo general conforme el vidrio sale recocido del lehr.

Hay procesos decorativos y superficiales que se realizan sobre ciertos productos de vidrio. Estos procesos incluyen el cortado mecánico y operaciones de pulimentado: limpieza por chorro de arena (sand blast), ataque químico (con ácido hidrofluorídico frecuentemente en combinación con otros compuestos químicos) y recubrimiento (por ejemplo, recubrir una placa de vidrio con aluminio o plata para producir espejos).

12.4 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

El vidrio posee propiedades especiales que lo hacen deseable para ciertas aplicaciones. Se han compilado las recomendaciones que siguen para el diseño de Bralla [1] y otras fuentes.

- ➢ El vidrio es transparente y tiene ciertas propiedades ópticas que son inusuales, si no es que únicas, para los materiales de la ingeniería. Para aplicaciones que requieren transparencia, transmisión de la luz, magnificación y propiedades ópticas similares, es probable que el material elegido sea el vidrio. Ciertos polímeros son transparentes y competitivos, lo que depende de los requerimientos de diseño.
- ➢ El vidrio es varias veces más fuerte a la compresión que a la tensión: los componentes deben diseñarse para quedar sujetos a fuerzas compresivas, no de tensión.
- ➢ Los cerámicos, incluido el vidrio, son frágiles. No deben usarse partes de vidrio en aplicaciones que involucren impactos de cargas o fuerzas grandes que lo podrían fracturar.
- ➢ Ciertas composiciones de vidrio tienen un coeficiente de expansión térmica muy bajo, por lo que toleran el choque térmico. Estos vidrios se seleccionan para aplicaciones en las que esta característica es importante.
- ➢ Las aristas y esquinas exteriores del vidrio deben tener radios o biseles grandes; de igual manera, las esquinas interiores deben tener un radio grande. Las esquinas tanto exteriores como interiores son puntos de concentración de los esfuerzos.
- ➢ A diferencia de las partes elaboradas con cerámicos tradicionales y nuevos, deben incluirse hebras en el diseño de piezas de vidrio; son factibles en lo técnico con los procesos de conformación de prensar y soplar. Sin embargo, las hebras deben ser gruesas.

REFERENCIAS

[1] Bralla, J. G. (editor en jefe). ***Design for Manufacturability Handbook,*** 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[2] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications,*** 4a. ed. Houghton Mifflin Publishing Company, Boston, Massachusetts, 1990.

[3] Hlavac, J. ***The Technology of Glass and Ceramics,*** Elsevier Scientific Publishing Company, Nueva York, 1983.

[4] McLellan, G. y Shand, E. B. ***Glass Engineering Handbook,*** 3a, ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1984.

[5] McColm, I. J. ***Ceramic Science for Materials Technologists,*** Chapman and Hall, Nueva York, 1983.

[6] Mohr, J. G. y Rowe, W. P. ***Fiber Glass,*** Krieger Publishing Company, Nueva York, 1990.

[7] Scholes, S. R. y Greene, C. H. ***Modern Glass Practice,*** 7a. ed. TechBooks, Marietta, Georgia, 1993.

PREGUNTAS DE REPASO

12.1. El vidrio se ha clasificado como un material cerámico, aunque es distinto de los cerámicos tradicionales y nuevos. ¿Cuál es la diferencia?

12.2. ¿Cuál es el compuesto químico predominante en casi todos los productos de vidrio?

12.3. ¿Cuáles son las tres etapas básicas de la secuencia del trabajo del vidrio?

12.4. Los hornos de fundición para trabajar el vidrio se dividen en cuatro tipos. Mencione tres de éstos.

12.5. Describa el proceso de girado en el trabajo del vidrio.

12.6. ¿Cuál es la diferencia principal entre los procesos de prensar y soplar, y de soplar y soplar al trabajar el vidrio?

12.7. Existen varias maneras de conformar láminas u hojas de vidrio. Mencione y describa en forma breve una de ellas.

12.8. Describa el proceso Danner.

12.9. En el texto se estudian dos procesos para formar fibras de vidrio. Mencione y describa brevemente una de ellas.

12.10. ¿Cuál es el propósito del recocido en el trabajo del vidrio?

12.11. Describa cómo se trata térmicamente una pieza de vidrio para producir vidrio templado.

12.12. Describa el tipo de material que es común utilizar para fabricar parabrisas de automóvil.

12.13. ¿Cuáles son algunas de las recomendaciones de diseño para piezas de vidrio?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 10 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

12.1. ¿Cuál de los términos siguientes se refiere al estado vítreo de un material?: *a*) cristalino, *b*) desvitrificado, *c*) policristalino, *d*) viciado *e*) vítreo.

12.2. Además de ayudar a proteger el ambiente, el uso de vidrio reciclado en la fabricación de vidrio, como ingrediente del material de inicio, ¿qué otro propósito útil tiene? (una respuesta): *a*) ayuda a dar variaciones de color al vidrio, con valor estético, *b*) hace que el vidrio sea más fácil de fundir, *c*) hace al vidrio más fuerte o *d*) reduce los olores en la planta.

12.3. ¿Cuál de las siguientes es la carga, en el trabajo del vidrio?: *a*) duración del ciclo de fundido, *b*) energía eléctrica que se requiere para fundir el vidrio, *c*) nombre que se da al horno de fundición, o *d*) materiales de inicio de la fundición.

12.4. Las temperaturas comunes de fundición del vidrio, ¿en cuál de los siguientes rangos están?: *a*) 400 ºC a 500 ºC, *b*) 900 ºC a 1 000 ºC, *c*) 1 500 ºC a 1 600 ºC, *d*) 2 000 ºC a 2 200 ºC.

12.5. La fundición es un proceso del trabajo del vidrio que se utiliza para *a*) producción elevada, *b*) producción baja o *c*) producción media.

12.6. ¿Cuál de los procesos siguientes o etapas de procesamiento no son aplicables al trabajo del vidrio?: *a*) recocido, *b*) prensado, *c*)enfriado, *d*) sinterizado y *e*) girado.

12.7. El proceso de prensar y soplar se adapta mejor a la producción de botellas (de boca estrecha) para bebidas, mientras que el proceso de soplar y soplar es más apropiado para producir frascos (de boca ancha): ¿*a*) verdadero o *b*) falso?

12.8. ¿Cuál de los procesos siguientes se usa para producir tubería de vidrio?: *a*) proceso Danner, *b*) prensado, *c*) rolado o *d*) girado.

12.9. Si una pieza de vidrio con espesor de pared de 5 mm (0.20 in) requiere de 10 min para recocerse, ¿cuánto tiempo requerirá una pieza de forma similar pero con espesor de pared de 7.5 mm (0.30 in)?, elija la respuesta más cercana: *a*) 10 min, *b*) 15 min, *c*) 20 min, *d*) 30 min.

12.10. ¿Cuál de los siguientes es un lehr?: *a*) una guarida de león, *b*) un horno de fundición, *c*) un horno de sinterizado, *d*) un horno de recocido o *e*) ninguno de los anteriores.

13 PROCESOS DE CONFORMADO PARA PLÁSTICOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los plásticos pueden conformarse en una variedad amplia de productos, tales como piezas moldeadas, secciones extruidas, películas y hojas, recubrimientos para aislar alambres eléctricos y fibras para textiles. Además, es frecuente que los plásticos sean el ingrediente principal de otros materiales, como pinturas y barnices, adhesivos y varios compuestos de matriz de polímero. En este capítulo se estudian las tecnologías por las que estos productos reciben su forma, y se deja para capítulos posteriores el análisis de pinturas y barnices, adhesivos y compuestos. Muchos procesos para darles forma a los plásticos se adaptan a los cauchos (capítulo 14) y a los compuestos de matriz de polímero (capítulo 15).

La relevancia comercial y tecnológica de estos procesos para dar forma se deriva de la creciente importancia de los materiales que se procesan. Durante los últimos 50 años, las aplicaciones de los plásticos se han incrementado a una tasa mucho más rápida que la de los metales o los cerámicos. La realidad es que muchas piezas que antes se hacían de metales, hoy se elaboran con plásticos y compuestos de plástico. Lo mismo ha ocurrido con el vidrio; los contenedores de plástico han sustituido ampliamente a las botellas de vidrio y jarras en el empaque de productos. El volumen total de los polímeros (plásticos y cauchos) excede hoy día el de los metales. Es posible identificar varias razones por las que los procesos para dar forma a los plásticos son importantes:

- La variedad de los procesos de formado y la facilidad con que se procesan los polímeros permiten una diversidad casi ilimitada de formas geométricas de las piezas por formar.
- Muchas piezas de plástico se forman por moldeo, que es un proceso de ***forma neta***; por lo general no se necesita una conformación adicional.
- Aunque generalmente se requiere calentamiento para conformar los plásticos, se necesita ***menos energía*** que para los metales porque las temperaturas de procesamiento son mucho menores.
- Debido a que en el procesamiento se emplean temperaturas menores, el manejo del producto se simplifica durante la producción. Debido a que muchos métodos para procesar plástico son operaciones de un solo paso (por ejemplo, moldeo), la cantidad de manejo del producto que se requiere se reduce de manera sustancial en comparación con los metales.
- No se requiere dar a los plásticos acabados con pintura o recubrimientos (excepto en circunstancias inusuales).

Como se estudió en el capítulo 8, los dos tipos de plásticos son los ***termoplásticos*** y los ***termofijos***. La diferencia está en que los termofijos pasan por un proceso de cura durante el calentamiento y la conformación, lo que ocasiona un cambio químico permanente (***enlazamiento cruzado***) en su estructura molecular. Una vez curados, no pueden fundirse si se vuelven a calentar. Por el contrario, los termoplásticos no se curan, y su estructura química permanece en lo básico sin cambios si se recalientan, aun cuando se transformen de sólido a fluido. De los dos tipos, los termoplásticos son, por mucho, el tipo de mayor importancia comercial, y comprenden más de 80% del peso total de los plásticos.

Los procesos para dar forma a los plásticos se clasifican de acuerdo con la forma geométrica del producto resultante: 1) productos extruidos continuos con sección transversal constante distinta de las hojas, películas y filamentos; 2) hojas y películas continuas; 3) filamentos continuos (fibras); 4) piezas moldeadas que son, sobre todo, sólidas; 5) piezas moldeadas huecas con paredes relativamente delgadas; 6) piezas discretas hechas de hojas y películas formadas; 7) fundidos y 8) productos de espuma. En este capítulo se estudiará cada una de estas categorías. Los procesos más importantes en el comercio son aquéllos asociados con los termoplásticos; los dos procesos de moldeo de mayor significancia son por extrusión y por inyección. En la nota histórica 13.1 se presenta una historia breve de los procesos para dar forma a los plásticos.

Se comienza el estudio de los procesos de dar forma a los plásticos por medio del análisis de las propiedades de los polímeros fundidos, porque casi todos los procesos para dar forma a los termoplásticos comparten la etapa común de calentar el plástico de modo que fluya.

Nota histórica 13.1 *Procesos para dar forma a los plásticos.*

El equipamiento para dar forma a los plásticos evolucionó en gran parte a partir de la tecnología de procesamiento del caucho. Entre los primeros que hicieron aportes destacó Edwin Chaffee, estadounidense que inventó un molino de dos rodillos calentados para mezclar aditivos con el caucho, alrededor de 1835 (sección 14.1.3). También fue el autor de un dispositivo similar llamado calandria, que consiste en una serie de rodillos calentados para recubrir tela con caucho (sección 13.3). Ambas máquinas siguen en uso para procesar tanto plásticos como cauchos.

Los primeros extrusores, que datan de alrededor de 1845, en Inglaterra, eran máquinas movidas por un martinete para extruir caucho y recubrir con éste alambres eléctricos. El problema con los extrusores de martinete es que operan en forma intermitente. Era muy deseable un extrusor que operara de modo continuo, en especial para hacer recubrimientos de alambres y cable. Aunque varias personas trabajaron con distintos grados de éxito en un extrusor tipo tornillo (sección 13.2.1), se da al crédito por este invento a Mathew Gray, de Inglaterra; su patente data de 1879. Después se desarrollaron los termoplásticos y se adaptaron a estos extrusores de tornillo, que habían sido diseñados originalmente para caucho. En 1935 se introdujo una máquina de extrusión diseñada en específico para termoplásticos.

Las máquinas de moldeo por inyección para plásticos fueron adaptaciones de equipo diseñado para fundición de metales con troquel (nota histórica 11.2). Alrededor de 1872, John Hyatt, figura importante en el desarrollo de los plásticos (nota histórica 8.1), patentó una máquina moldeadora especial para plásticos. Era una de tipo émbolo (sección 13.6.3). La forma moderna de la máquina de moldeo por inyección se introdujo en 1921, con controles semiautomáticos que se agregaron en 1937. Las máquinas de tipo martinete fueron el estándar en la industria del moldeo de plástico durante muchas décadas, hasta que se hizo evidente la superioridad de la de tipo tornillo reciprocante, inventada por William Willert en Estados Unidos, en 1952.

13.1 PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS FUNDIDOS

Para dar forma a un polímero termoplástico éste debe calentarse de modo que se suavice hasta adquirir la consistencia de un líquido. Esta forma se denomina ***polímero fundido***, que tiene varias propiedades y características únicas, que se estudian en esta sección.

Viscosidad Debido a su alto peso molecular, un polímero fundido es un fluido espeso con viscosidad elevada. Tal como se definió el término en la sección 3.4, la ***viscosidad*** es una propiedad de los fluidos que relaciona la fuerza cortante que se experimenta durante el movimiento del fluido con la tasa de deformación. La viscosidad es importante en el procesamiento de polímeros porque la mayoría de métodos para dar forma involucran el flujo del polímero fundido a través de canales pequeños o aberturas de troqueles. Es frecuente que los gastos o caudales sean elevados, lo que genera tasas elevadas de corte; y las fuerzas de corte se incrementan con la velocidad de corte, por lo que se requieren presiones significativas para efectuar los procesos.

En la figura 13.1 se muestra la viscosidad como función de la velocidad de corte para dos tipos de fluidos. Para un ***fluido newtoniano*** (que incluye la mayor parte de fluidos simples, como agua y aceite) la viscosidad es constante a una temperatura dada; no cambia

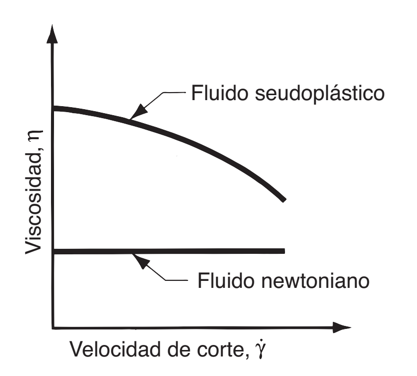


FIGURA 13.1 Relaciones de la viscosidad para un fluido newtoniano y un polímero fundido común.

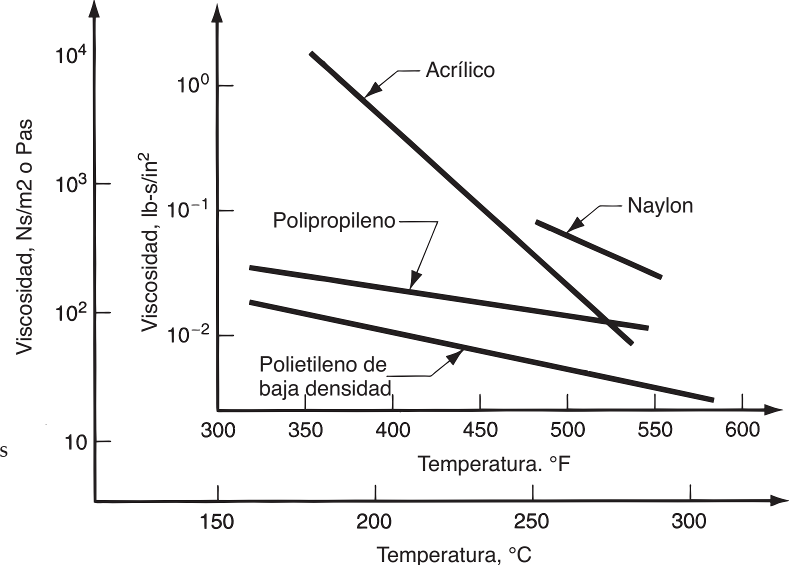


FIGURA 13.2 La viscosidad como función de las temperaturas para polímeros seleccionados a una velocidad de corte de $10^3 s^{-1}$. (Datos recopilados de la referencia [12]).

con la velocidad de corte. La relación entre la fuerza cortante y la deformación cortante es proporcional, con la viscosidad como constante de proporcionalidad:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad \text{o bien} \quad \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{13.1}$$

donde τ = fuerza cortante, Pa (lb/in^2); η = coeficiente de viscosidad cortante, Ns/m^2, o Pas (lb-s/in^2); y $\dot{\gamma}$ = velocidad de corte, 1/s (1/s). Sin embargo, para un polímero fundido, la viscosidad decrece con la velocidad de corte, lo que indica que el fluido se vuelve más delgado a tasas más elevadas de corte. Este comportamiento se llama ***seudoplasticidad***, y lo modela la expresión siguiente con una aproximación razonable:

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \tag{13.2}$$

donde k = constante que corresponde al coeficiente de viscosidad, y n = índice de comportamiento del flujo. Para $n = 1$, la ecuación se reduce a la (13.1) para un fluido newtoniano, y la k se convierte en η. Para un polímero fundido, los valores de n son menores que 1.

Además del efecto de la velocidad de corte (gasto del fluido), la viscosidad de un polímero fundido también se ve afectada por la temperatura. Como ocurre con la mayoría de los fluidos, el valor disminuye con el aumento de la temperatura. Esto se ilustra en la figura 13.2 para varios polímeros comunes a la misma velocidad de corte de 10^3 s^{-1}. Esta velocidad de corte se aproxima a aquélla encontrada en el moldeo por inyección y en operaciones de extrusión de alta velocidad.

Así, se observa que la viscosidad de un polímero fundido disminuye con valores crecientes de velocidad de corte y de temperatura. Puede aplicarse la ecuación (13.2), excepto que k depende de la temperatura, como se muestra en la figura 13.2.

Viscoelasticidad Otra propiedad que poseen los polímeros fundidos es la ***viscoelasticidad***. Esta propiedad se estudió en el contexto de polímeros sólidos, en la sección 3.5. Sin embargo, también la tienen los polímeros líquidos. Un buen ejemplo es la ***expansión del troquel*** en la extrusión, en la que el plástico caliente se expande conforme sale de la abertura del troquel. El fenómeno, que se ilustra en la figura 13.3, se explica si se observa que el polímero estaba contenido en una sección transversal mucho más grande antes de ingresar al canal angosto del troquel. En efecto, el material extruido "recuerda" su forma y trata de regresar a ella después de dejar el orificio del troquel. En palabras más técnicas,

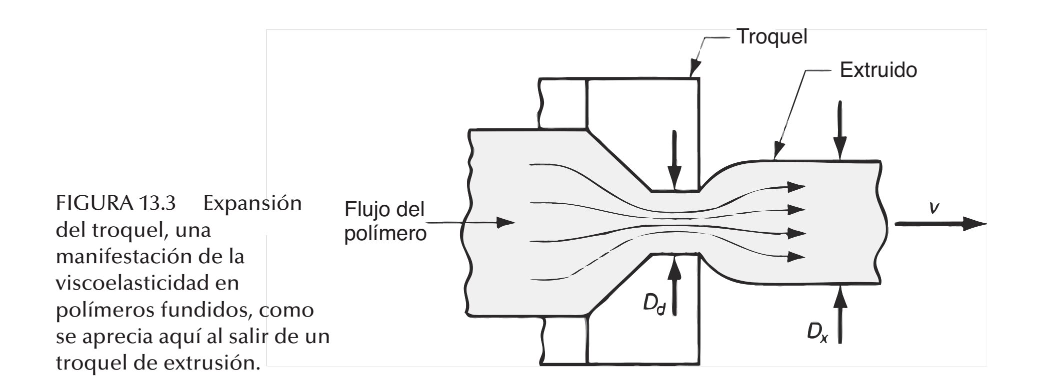


FIGURA 13.3 Expansión del troquel, una manifestación de la viscoelasticidad en polímeros fundidos, como se aprecia aquí al salir de un troquel de extrusión.

los esfuerzos de compresión que actúan sobre el material conforme ingresa a la abertura pequeña del troquel no se relajan de inmediato. Cuando el material sale después del orificio y la restricción desaparece, los esfuerzos no liberados hacen que la sección transversal se expanda.

La expansión del troquel se mide con más facilidad para una sección transversal circular, por medio de la ***razón de expansión,*** que se define como

$$r_s = \frac{D_x}{D_d} \tag{13.3}$$

donde r_s = razón de expansión; D_x = diámetro de la sección transversal extruida, mm (in); y D_d = diámetro del orificio del troquel, mm (in). La cantidad de expansión del troquel depende del tiempo que el polímero fundido pasa en el canal de éste. Al incrementarse el tiempo en el canal, por medio de uno de mayor longitud, se reduce la expansión del troquel.

13.2 EXTRUSIÓN

La extrusión es uno de los procesos fundamentales para dar forma a los metales y cerámicos, así como a los polímeros. La ***extrusión*** es un proceso de compresión en el que se fuerza al material a fluir a través de un orificio practicado en un troquel a fin de obtener un producto largo y continuo, cuya sección transversal adquiere la forma determinada por la del orificio. Como proceso para dar forma a polímeros, se emplea mucho para termoplásticos y elastómeros (rara vez para termofijos) para producir en masa artículos tales como tubería, ductos, mangueras y formas estructurales (tales como molduras para ventanas y puertas), hojas y película, filamentos continuos, así como recubrimientos para alambres y cables eléctricos. Para estos tipos de productos, la extrusión se lleva a cabo como proceso continuo; el ***extruido*** (producto extruido) se corta después con las longitudes deseadas. En esta sección se estudia el proceso básico de extrusión, y en varias de las posteriores se examinan procesos que se basan en ésta.

13.2.1 Proceso y equipo

En la extrusión de polímeros, se alimenta material en forma de ***pellets*** o polvo hacia dentro de un barril de extrusión, donde se calienta y funde y se le fuerza para que fluya a través de la abertura de un troquel por medio de un tornillo rotatorio, como se ilustra en la figura 13.4. Los dos componentes principales del extrusor son el barril y el tornillo. El troquel no es un componente del extrusor; es una herramienta especial que debe fabricarse para el perfil particular que se va a producir.

Es común que el diámetro interno del barril del extrusor varíe entre 25 y 150 mm (1.0 a 6.0 in). El barril es largo en relación con su diámetro, con razones L/D que, por lo general, están entre 10 y 30. Para mayor claridad del dibujo, en la figura 13.4 está reducida la razón L/D. Las razones más altas se emplean para materiales termoplásticos, en tanto que los valores L/D más bajos son para los elastómeros.

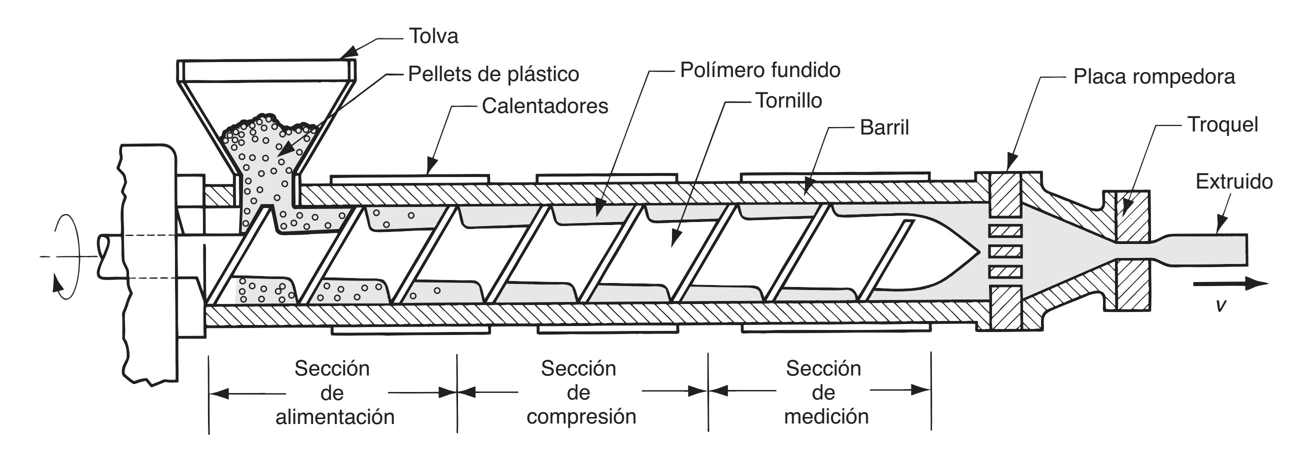


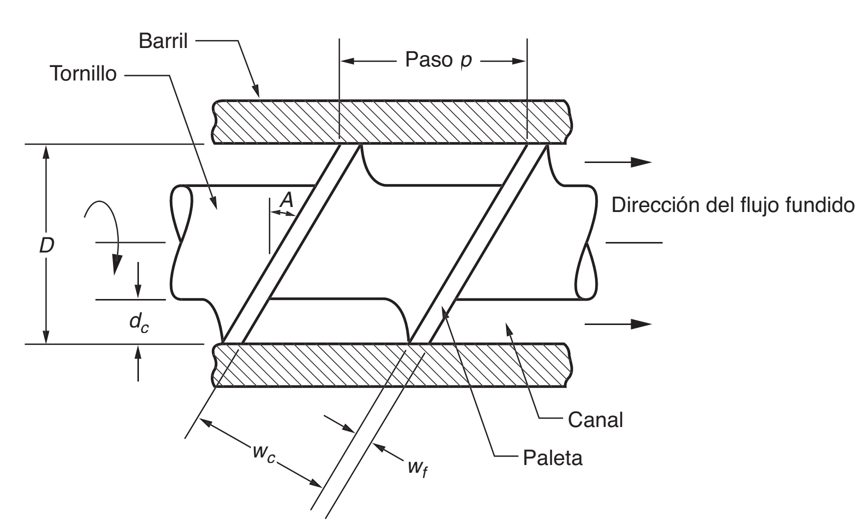
FIGURA 13.4 Componentes y características de un extrusor (de un solo tornillo) para plásticos y elastómeros.

En el extremo del barril opuesto al troquel se localiza una tolva que contiene el material que se alimenta. Los pellets se alimentan por gravedad al tornillo rotatorio, cuya rosca mueve al material a lo largo del barril. Se utilizan calentadores eléctricos para fundir al inicio los pellets sólidos; después, la mezcla y el trabajo mecánico del material generará calor adicional, lo que mantiene fundido al material. En ciertos casos, se suministra calor suficiente a través de la mezcla y acción cortante de modo que no se requiere calor externo. En realidad, en ciertos casos el barril debe enfriarse desde el exterior a fin de impedir el sobrecalentamiento del polímero.

El material se hace avanzar a lo largo del barril hacia la abertura del troquel, por medio de la acción del tornillo extrusor, que gira a unas 60 rev/min. El tornillo tiene varias funciones y se divide en secciones que son: 1) ***sección de alimentación***, en la que el material se mueve del puerto de la tolva y recibe precalentamiento; 2) ***sección de compresión***, en la que el polímero se transforma para adquirir consistencia líquida, se extrae del fundido el aire atrapado entre los pellets y se comprime el material; y 3) ***sección de medición***, en la que se homogeniza al fundido y se genera presión suficiente para bombearlo a través de la abertura del troquel.

La operación del tornillo está determinada por su forma geométrica y velocidad de rotación. En la figura 13.5 se ilustra la forma común de un tornillo extrusor. El tornillo consiste en "paletas" (cuerdas) en forma de espiral, con canales entre ellas por los que

FIGURA 13.5 Detalles de un tornillo extrusor dentro del barril.



avanza el polímero fundido. El canal tiene un ancho w_c y profundidad d_c. Conforme el tornillo gira, las cuerdas empujan al material hacia delante a través del canal, del extremo de la tolva del barril al troquel. Aunque en el diagrama no se distingue, el diámetro de la cuerda es menor que el del barril, D, por un claro muy pequeño, alrededor de 0.05 mm (0.002 in). La función del claro es limitar la fuga del fundido posterior por la parte trasera del canal. La cuerda tiene un ancho w_f y está hecha de acero endurecido a fin de que resista el uso cuando gira y presiona contra el interior del barril. El tornillo tiene un paso cuyo valor, por lo general, se acerca al del diámetro D. El ángulo de las cuerdas, A, es el de la hélice del tornillo, y se determina con la relación

$$\tan A = \frac{p}{\pi D} \tag{13.4}$$

donde p = ancho del tornillo.[1]

El incremento de la presión aplicada al polímero fundido en las tres secciones del barril está determinado en mucho por la profundidad del canal, d_c. En la figura 13.4, d_c es relativamente grande en la sección de alimentación para permitir la entrada de cantidades importantes de polímero granular al barril. En la sección de compresión, d_c se reduce en forma gradual, con lo que se aplica presión mayor sobre el polímero conforme se funde. En la sección de medición, d_c se reduce y la presión alcanza un máximo según se restringe el flujo por la pantalla y la placa posterior. Las tres secciones del tornillo se ilustran en la figura 13.4 como si tuvieran longitud igual; esto es apropiado para un polímero que se funde gradualmente, como un polietileno de baja densidad. Para otros polímeros, las longitudes óptimas son diferentes. Para polímeros cristalinos tales como el naylon, la fusión ocurre en forma abrupta en su punto específico de fusión, y por ello es apropiado que la sección de compresión sea corta. Los polímeros amorfos, como el cloruro de polivinilo, se funden con mayor lentitud que el LDPE, y la zona de compresión para dichos materiales debe cubrir casi toda la longitud del tornillo. Aunque el diseño óptimo del tornillo es distinto para cada tipo de material, es práctica común usar tornillos de propósito general. Estos diseños representan un compromiso entre los materiales diferentes, y evitan la necesidad de hacer cambios frecuentes de tornillo, lo que resultaría en una pérdida costosa del tiempo del equipo.

El avance del polímero a lo largo del barril lo hace llegar en última instancia a la zona muerta. Antes de llegar al troquel, el fundido pasa a través del paquete de la pantalla, una serie de mallas de alambre sostenidas por una placa rígida (llamada ***placa rompedora***) que contiene agujeros axiales pequeños. El paquete de la pantalla sirve para 1) filtrar los contaminantes y grumos duros del fundido, 2) generar presión en la sección de medición y 3) forzar al flujo del polímero fundido y borrar de su "memoria" el movimiento circular impuesto por el tornillo. Esta última función tiene que ver con la propiedad viscoelástica del polímero; si el flujo no se forzara, el polímero repetiría su historia de girar dentro de la cámara de extrusión, y tendería a rotar y distorsionar el extruido.

Lo que se ha descrito aquí es la ***máquina de extrusión de un solo tornillo.*** También debe mencionarse los ***extrusores de tornillos gemelos***, ya que ocupan un lugar importante en la industria. En estas máquinas, los tornillos son paralelos y se encuentran lado a lado dentro del barril. Los extrusores de tornillos gemelos parecen adaptarse en especial al PVC rígido, el cual es un polímero difícil de extruir, y a materiales que requieren una mezcla mayor.

13.2.2 Análisis de la extrusión

En esta sección se desarrollan modelos matemáticos para describir, en forma simplificada, varios aspectos de la extrusión de polímeros.

[1] Desafortunadamente, p es el símbolo natural que se usa en este capítulo para dos variables. Representa el paso del tornillo, aquí y en otros capítulos. Más adelante, en este capítulo, se usa el mismo símbolo, p, para la presión.

Flujo fundido en el extrusor Conforme el tornillo gira dentro del barril, el polímero fundido se ve forzado a moverse hacia delante, en dirección del troquel; el sistema opera en forma muy parecida a un tornillo de Arquímedes. El mecanismo principal de transporte es el ***flujo por arrastre,*** que resulta de la fricción entre el líquido viscoso y las dos superficies opuestas que se mueven una respecto de la otra; 1) el barril estacionario y 2) el canal del tornillo giratorio. El arreglo se asemeja al movimiento de fluido que ocurre entre una placa estacionaria y una móvil, a las que separa un líquido viscoso, como se ilustra en la figura 3.17. Dado que la placa móvil tiene una velocidad v, se puede pensar que la velocidad promedio del fluido es $v/2$, lo que da por resultado un gasto volumétrico de

$$Q_d = 0.5\upsilon\, d\, w \tag{13.5}$$

donde Q_d = gasto volumétrico por arrastre, m^3/s (in^3/s); v = velocidad de la placa móvil, m/s (in/s); d = distancia que separa las dos placas, m (in); y w = el ancho de las placas perpendicular a la dirección de la velocidad, m (in). Estos parámetros se comparan con aquéllos en el canal definidos por el tornillo de extrusión rotatorio y la superficie del barril estacionario.

$$\upsilon = \pi DN \cos A \tag{13.6}$$

$$d = d_c \tag{13.7}$$

$$\text{y} \quad w = w_c = (\pi D \tan A - w_f)\cos A \tag{13.8}$$

donde D = diámetro de la cuerda del tornillo, m (in); N = velocidad rotacional del tornillo, rev/s; d_c = profundidad del canal del tornillo, m (in); w_c = ancho del canal del tornillo, m (in); A = ángulo de la cuerda; y w_f = ancho del filo de la cuerda, m (in). Si se supone que el ancho del filo de la cuerda es tan pequeño que es despreciable, entonces la última ecuación se reduce a

$$w_c = \pi\ D \tan A \cos A = \pi\ D \text{ sen A} \tag{13.9}$$

Al sustituir las ecuaciones (13.6), (13.7) y la (13.9) en la ecuación (13.5), y con el empleo de varias identidades trigonométricas, se obtiene

$$Q_d = 0.5\pi^2 D^2 N d_c \text{ sen A } \cos A \tag{13.10}$$

Si no hay fuerzas presentes que resistan el movimiento hacia delante del fluido, esta ecuación proveería una descripción razonable del gasto fundido dentro del extrusor. Sin embargo, al comprimir el polímero fundido a través del troquel corriente abajo, se crea una ***contrapresión*** en el barril que reduce el material que se mueve por flujo de arrastre en la ecuación (13-10). Esta reducción del flujo, que se llama ***flujo a contrapresión***, depende de las dimensiones del tornillo, la viscosidad del polímero fundido y el gradiente de presión a lo largo del barril. Estas dependencias se resumen en la siguiente ecuación [12]:

$$Q_b = \frac{\pi\ D d_c^3 \text{ sen}^2 A}{12\eta}\left(\frac{dp}{dl}\right) \tag{13.11}$$

donde Q_b = flujo a contrapresión, m^3/s (in^3/s); η = viscosidad, N-s/m^2 (lb-s-in^2); dp/dl = gradiente de presión, MPa/m (lb/in^2/in); los demás términos ya se definieron antes. El gradiente de presión real en el barril es función de la forma del tornillo a lo largo de su longitud; en la figura 13.6 se da un perfil común de la presión. Si como aproximación se supone que el perfil es una línea recta, que en la figura se indica con una línea de rayas, entonces el gradiente de presión se vuelve constante p/L y la ecuación anterior se reduce a

$$Q_b = \frac{p\pi\ D d_c^3 \text{ sen}^2 A}{12\eta L} \tag{13.12}$$

donde p = presión piezométrica en el barril, MPa (lb/in^2); y L = longitud del barril, m (in). Hay que recordar que este flujo a contrapresión en realidad no es un flujo real por sí mismo;

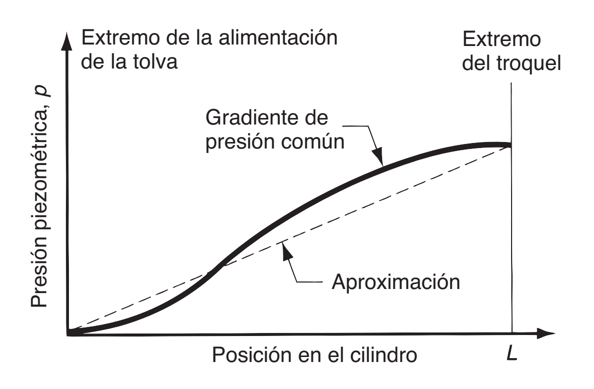


FIGURA 13.6 Gradiente de presión común en un extrusor; la línea de rayas indica una aproximación lineal recta para facilitar los cálculos.

es una reducción en el flujo por arrastre. Así, la magnitud del flujo fundido en un extrusor se calcula como la diferencia entre el flujo por arrastre y el flujo a contrapresión:

$$Q_x = Q_d - Q_b$$
$$Q_x = 0.5\pi^2 D^2 N d_c \text{ sen } A \cos A - \frac{p\pi D d_c^3 \text{ sen}^2 A}{12\eta L} \tag{13.13}$$

donde Q_x = gasto resultante del polímero fundido en el extrusor. La ecuación (13.13) supone que hay una ***fuga de flujo*** mínima a través del claro entre las cuerdas y el barril. La fuga de flujo de líquido será pequeña en comparación con el flujo por presión de arrastre y retrocesos, excepto en extrusores mal utilizados.

La ecuación (13.13) contiene muchos parámetros, que pueden dividirse en dos tipos: 1) de diseño y 2) de operación. Los parámetros de diseño son aquellos que definen la configuración geométrica del tornillo y del barril: diámetro D, profundidad del canal d_c, y ángulo de la hélice A. Para una operación de extrusor dado, estos factores no pueden cambiar durante el proceso. Los parámetros de operación son aquéllos susceptibles de cambiar durante el proceso, para afectar el flujo de salida; incluyen la velocidad rotacional N, presión piezométrica p y viscosidad del fundido η. Por supuesto, la viscosidad del fundido es controlable sólo hasta el grado en que la temperatura y la velocidad de corte se pueden manipular para afectar dicha propiedad. Ahora, en el ejemplo que sigue, se verá la manera como los parámetros juegan sus papeles.

Ejemplo 13.1
Gastos de extrusión

Un barril extrusor tiene un diámetro D = 75 mm. El tornillo gira a N = 1 rev/s. La profundidad del canal es d_c = 6.0 mm y el ángulo de la cuerda A = 20º. La presión piezométrica en el extremo del barril $p = 7.0 \times 10^6$ Pa, la longitud del barril L = 1.9 m, y la viscosidad del polímero fundido se supone de η = 100 Pa. Determine el gasto volumétrico del plástico en el barril Q_s.

Solución: Con la ecuación (13.13) puede calcularse el flujo de arrastre y oponerse al flujo de contrapresión en el barril.

$$Q_d = 0.5\pi^2 (75\times10^{-3})^2 (1.0)(6\times10^{-3})(\text{sen } 20)(\cos 20) = 53\ 525(10^{-9})\text{m}^3/\text{s}$$
$$Q_d = \frac{\pi(7\times10^6)(75\times10^{-3})(6\times10^{-3})^3(\text{sen } 20)^2}{12(100)(1.9)} = 18\ 276(10^{-6})18\ 276(10^{-9})\text{m}^3/\text{s}$$
$$Q_x = Q_d - Q_b = (53\ 525\times18\ 276)(10^{-9}) = \mathbf{35\ 249(10^{-9})m^3/s}$$

Características del extrusor y del troquel Si la contrapresión es igual a cero, de modo que el flujo fundido no tenga restricción en el extrusor, entonces el flujo sería igual al flujo por arrastre Q_d dado por la ecuación (13.10). Dados los parámetros de diseño y operación

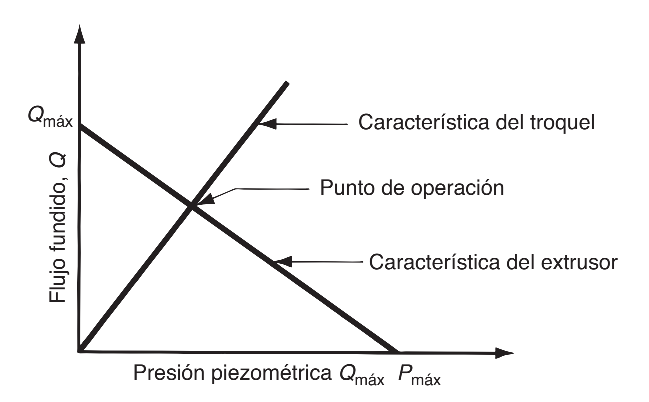


FIGURA 13.7 Característica del extrusor (también llamada característica del tornillo) y característica del troquel. El punto de operación del extrusor está en la intersección de las dos líneas.

(D, A, N, etc.), ésta es la capacidad de flujo máximo posible del extrusor. Se denotará como $Q_{máx}$:

$$Q_{máx} = 0.5\pi^2 D^2 N\, d_c \;\text{sen}\, A \;\cos A \tag{13.14}$$

Por otro lado, si la contrapresión fuera tan grande que ocasionara un flujo igual a cero, entonces el flujo a contrapresión sería igual al flujo por arrastre; es decir,

$$Q_x = Q_d - Q_b = 0, \quad \text{por lo tanto,} \quad Q_d = Q_b$$

Con el uso de las expresiones para Q_d y Q_b en la ecuación (13.13), se puede resolver para p a fin de determinar cuál tendría que ser la presión piezométrica máxima $p_{máx}$ para hacer que no hubiera flujo en el extrusor:

$$p_{máx} = \frac{6\pi DNL_\eta \cot A}{d_c^2} \tag{13.15}$$

Los dos valores $Q_{máx}$ y $p_{máx}$ son puntos a lo largo de los ejes del diagrama conocido como ***característica del extrusor*** (o bien ***característica del tornillo***), como se ve en la figura 13.7. Define la relación entre la presión piezométrica y el gasto en una máquina de extrusión con parámetros de operación dados.

Con un troquel en la máquina y el proceso de extrusión en marcha, los valores reales de Q_x y p estarán en algún punto entre los valores extremos, la ubicación determinada por las características del troquel. El gasto a través de éste depende del tamaño y la forma de la abertura y de la presión que se aplique para forzar al fundido a pasar por aquélla. Esto se expresa así:

$$Q_x = K_s p \tag{13.16}$$

donde Q_x es el gasto, en m^3/s (in^3/s); p = presión piezométrica, Pa (lb/in^2); y K_s = factor de forma para el troquel, m^5/Ns (in^5/lb-s). Para una abertura circular en el troquel, con una longitud de canal dada, el factor de forma se calcula [12] como:

$$k_s = \frac{\pi D_d^4}{128\eta L_d} \tag{13.17}$$

donde D_d = diámetro de la abertura del troquel, m (in); η = viscosidad del fundido, N-s/m^2 (lb-s/in^2); y L_d = longitud de la abertura del troquel, m (in). Para formas distintas de la circular, el factor de forma del troquel es menor que para uno redondo con la misma superficie de su sección transversal, lo que significa que se requiere una presión mayor para obtener el mismo gasto.

La relación entre Q_x y p en la ecuación (13.16) se denomina ***característica del troquel***. En la figura 13.7 aparece como una línea recta, que se intersecta con la característica del extrusor anterior. El punto de intersección identifica los valores de Q_x y p que se conocen como ***punto de operación*** para el proceso de extrusión.

Ejemplo 13.2 Características del extrusor y del troquel

Considere el extrusor del ejemplo 13.1, en el que $D = 75$ mm, $L = 1.9$ m, $N = 1$ rev/s, $d_c =$ 6 mm y $A = 20°$. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante $\eta = 100$ Pa. Determine: *a*) $Q_{máx}$ y $p_{máx}$, *b*) el factor de forma K_s para una abertura circular de troquel en el que $D_d = 6.5$ mm y $L_d = 20$ mm y c) los valores de Q_x y p en el punto de operación.

Solución: *a*) $Q_{máx}$ está dado por la ecuación (13.14).

$$Q_{máx} = 0.5\pi^2 D^2 N d_c \text{ sen } A \cos A = 0.5\pi^2 (75\times10^{-3})^2 (1.0)(6\times10^{-3})(\text{sen}20)(\cos 20)$$
$$= \mathbf{53\,525(10^{-9})m^3/s}$$

$p_{máx}$ está dado por la ecuación (13.15).

$$p_{máx} = \frac{6\pi DNL_\eta \cot A}{d_c^2} = \frac{6\pi(75\times10^{-3})(1.9)(1.0)(100)\cot 20}{(6\times10^{-3})^2} = \mathbf{20\ 499\ 874\ Pa}$$

Estos dos valores definen la intersección con la ordenada y la abscisa para la característica del extrusor.

b) El factor de forma para una abertura circular de troquel con $D_d = 6.5$ mm y $L_d =$ 20 mm se puede determinar a partir de la ecuación (13.17).

$$K_s = \frac{\pi(6.5\times10^{-3})^4}{128(100)(20\times10^{-3})} = \mathbf{21.9(10^{-12})m^5/Ns}$$

Este factor de forma define la pendiente de la característica del troquel.

c) El punto de operación está definido por los valores de Q_x y p, en los que la característica del tornillo se intersecta con la del troquel. La característica del tornillo se expresa como la ecuación de la línea recta entre $Q_{máx}$ y $p_{máx}$, que es

$$Q_x = Q_{máx} - (Q_{máx}/p_{máx})p$$
$$= 53\ 525(10^{-9}) - (53\ 525(10^{-9})/20\ 499\ 874)p = 53\ 525(10^{-9}) - 2.611(10^{-12})p \tag{13.18}$$

La característica del troquel está dada por la ecuación (13.16), con el uso del valor de K_s, que se calculó en el inciso *b*).

$$Q_x = 21.9(10^{-12})p$$

Al igualar las dos ecuaciones, se tiene

$$53\ 525(10^{-9}) - 2.611(10^{-12})p = 21.9(10^{-12})p$$
$$p = \mathbf{2.184(10^{-6})Pa}$$

Al resolver para Q_x, con el empleo de una de las ecuaciones iniciales, se obtiene

$$Q_x = 53.525(10^{-6}) - 2.611(10^{-12})(2.184)(10^6) = \mathbf{47.822(10^{-6})m^3/s}$$

Al revisar esta ecuación con la otra para comprobar,

$$Q_x = 21.9(10^{-12})(2.184)(10^6) = 47.82(10^{-6})m^3/s$$

13.2.3 Configuraciones del troquel y productos extruidos

La forma del orificio del troquel determina la forma de la sección transversal del extruido. Se puede enumerar los perfiles de troquel comunes y las formas extruidas correspondientes, como sigue: 1) perfiles sólidos, 2) perfiles huecos, como tubos, 3) recubrimientos de alambre y cable, 4) hoja y película y 5) filamentos. Las tres primeras categorías se estudian en la

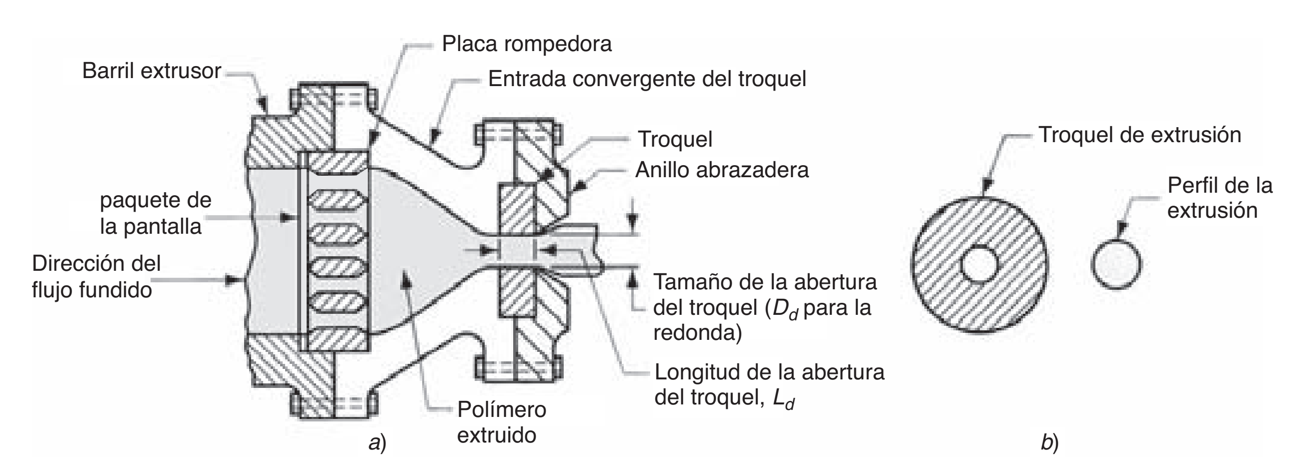


FIGURA 13.8 *a*) Vista lateral de la sección transversal de un troquel de extrusión para formas sólidas regulares, como cilindros; *b*) vista frontal del troquel, con el perfil del extruido. En ambas vistas es evidente la expansión del troquel. (Por claridad, se omiten o simplifican algunos detalles de construcción del troquel.)

presente sección. Los métodos para producir lámina y película se examinan en la sección 13.3; y la producción de filamento, en la 13.4. En ocasiones, estas últimas formas involucran procesos de formado adicionales a la extrusión.

Perfiles sólidos Éstos incluyen formas regulares: círculos, cuadrados y secciones transversales tales como formas estructurales, molduras para puertas y ventanas, y accesorios para automóviles y viviendas. La sección trasversal de la vista lateral de un troquel para estas formas sólidas se ilustra en la figura 13.8. Justo más allá del extremo del tornillo y antes del troquel, el polímero fundido pasa a través del paquete de la pantalla y la placa rompedora para fortalecer las líneas de flujo. Después fluye hacia la entrada (por lo general) convergente del troquel; la forma está diseñada para mantener un flujo laminar y evitar puntos muertos en las esquinas que de otro modo estarían presentes cerca del orificio. Después, el fundido avanza a través de la abertura misma del troquel.

Cuando el material sale del troquel, todavía está suave. Los polímeros con viscosidades de fundido altas son los mejores candidatos para la extrusión, ya que adoptan su mejor forma durante el enfriamiento. Éste se lleva a cabo por medio de soplar aire, rociar agua o pasar el extruido a través de un conducto de agua. Para compensar la expansión del troquel, la abertura de éste se hace suficientemente larga para eliminar algo de la memoria del polímero fundido. Además, es frecuente que se haga que el extruido se extraiga (estire) para evitar la expansión del troquel.

Para distintas formas de la redonda, la abertura del troquel se diseña con una sección transversal que es ligeramente distinta del perfil que se desea, por lo que el efecto de la expansión del troquel es proveer una corrección de la forma. En la figura 13.9 se ilustra dicha corrección para una sección transversal cuadrada. Debido a que polímeros diferentes

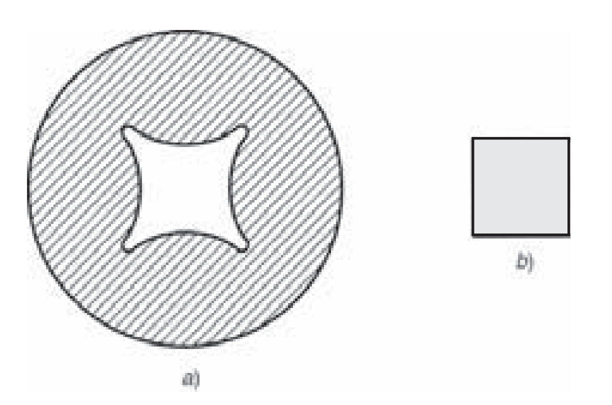


FIGURA 13.9 *a*) Sección transversal del troquel que muestra el perfil del orificio requerido para obtener *b*) un perfil cuadrado para el extruido.

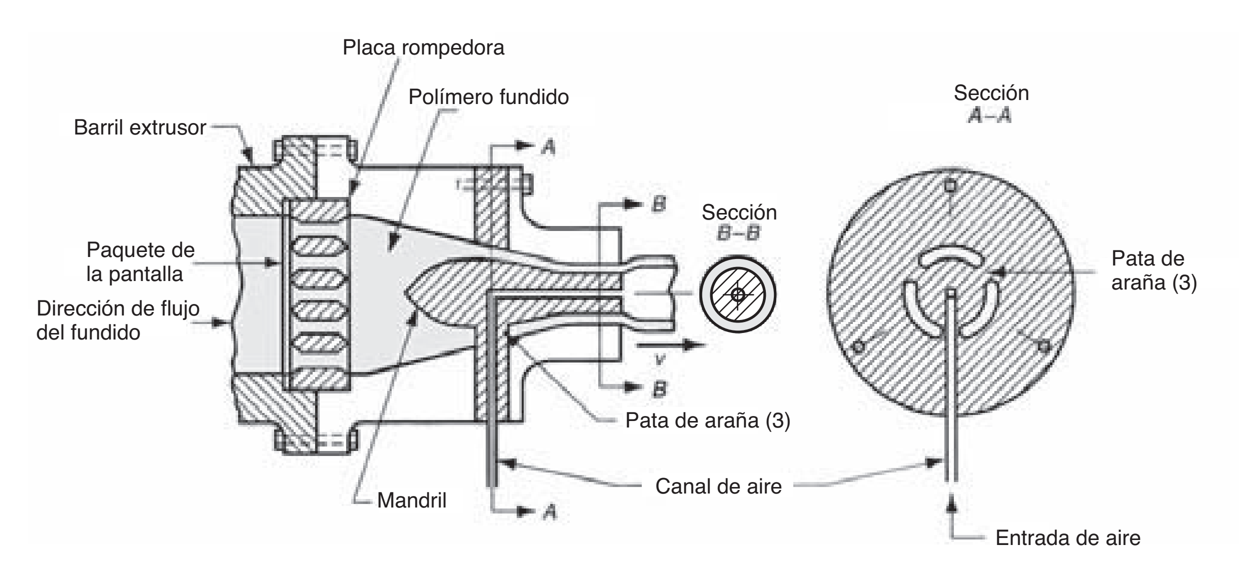


FIGURA 13.10 Sección transversal de la vista lateral de un troquel de extrusión para dar forma a secciones transversales huecas, como tubos y tuberías; la sección A-A es una sección transversal de la vista frontal que muestra la forma en que el difusor permanece en su sitio; La sección B-B muestra la sección transversal tubular justo antes de salir del troquel; la expansión del troquel ocasiona un agrandamiento del diámetro. (Se ha simplificado algunos detalles de la construcción del troquel.)

presentan grados distintos de expansión del troquel, la forma de éste depende del material por extruir. Se requieren habilidad y criterio considerables por parte del diseñador de troqueles para obtener secciones transversales complejas.

Perfiles huecos La extrusión de perfiles huecos, tales como tubos, tuberías, mangueras y otras secciones transversales que incluyen agujeros, requiere un mandril para obtener la forma hueca. En la figura 13.10 se presenta una configuración común del troquel. El mandril es mantenido en su lugar con el empleo de una araña, que se aprecia en la sección A-A de la figura. El polímero fundido fluye alrededor de las patas dando soporte al mandril para reunirse en una pared de tubo monolítica. Es frecuente que el mandril incluya un canal a través del cual se inyecta aire para mantener la forma hueca del extruido mientras se endurece. Las tuberías y los tubos se enfrían por medio de canales de agua abiertas o haciendo pasar el extruido suave a través de un tanque lleno de agua con el ajuste de tuberías que limitan el diámetro exterior del tubo mientras se mantiene la presión del aire en el interior.

Recubrimiento de alambre y cable El recubrimiento de alambre y cable para aislarlos es uno de los procesos de extrusión de polímeros más importantes. Como se aprecia en la figura 13.11, para recubrir alambre se aplica el polímero a éste conforme se tira de él a alta velocidad a través de un troquel. Se crea un vacío ligero entre el alambre y el polímero para facilitar la adhesión del recubrimiento. El alambre tenso provee rigidez durante el enfriamiento, a lo que, por lo general, se contribuye haciendo pasar el alambre recubierto a través de un canal de agua. El producto se enrolla en carretes grandes a velocidades de hasta 50 m/s (10 000 ft/min).

13.2.4 Defectos de la extrusión

Los productos extruidos presentan cierto número de defectos. Uno de los peores es la ***fractura del fundido***, en la que las tensiones que actúan sobre el fundido inmediatamente antes y durante su paso a través del troquel son tan grandes que ocasionan una falla, que se manifiesta en forma de la superficie muy irregular del extruido. Como se sugiere en la

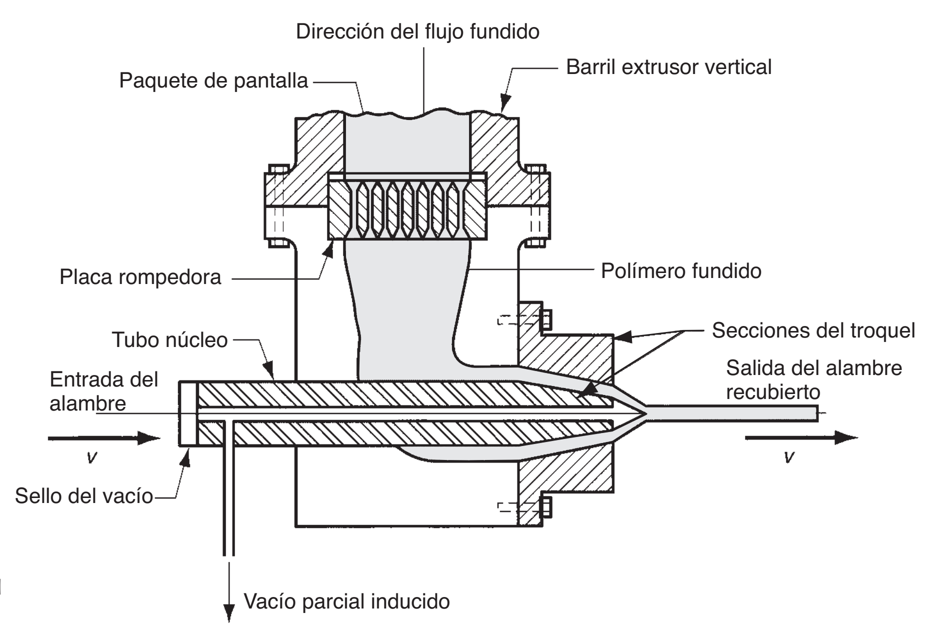


FIGURA 13.11 Sección transversal de la vista lateral del troquel para recubrir conductores eléctricos por medio de extrusión. (Se simplificaron algunos detalles de construcción del troquel.)

figura 13.12, la fractura del fundido puede ser ocasionada por una reducción brusca de la entrada del troquel, lo que provoca un flujo turbulento que rompe el fundido. Esto contrasta con las líneas de corriente del flujo laminar en el troquel que converge en forma gradual de la figura 13.8.

Un defecto más común de la extrusión es la ***piel de tiburón***, en la que la superficie del producto se arruga al salir del troquel. Conforme el fundido fluye a través de la abertura del troquel, la fricción en la interfaz ocasiona un perfil de velocidad a través de la sección transversal, como se ve en la figura 13.13. Los esfuerzos de tensión aparecen en la superficie al estirarse este material para estar a la par con el núcleo central que se mueve más rápido. Estos esfuerzos ocasionan rupturas menores que arrugan la superficie. Si el gradiente de velocidad se vuelve extremo, aparecen marcas prominentes en la superficie, lo que le da el aspecto de un tronco de bambú; de ahí el nombre de ***bambú*** para este defecto más severo.

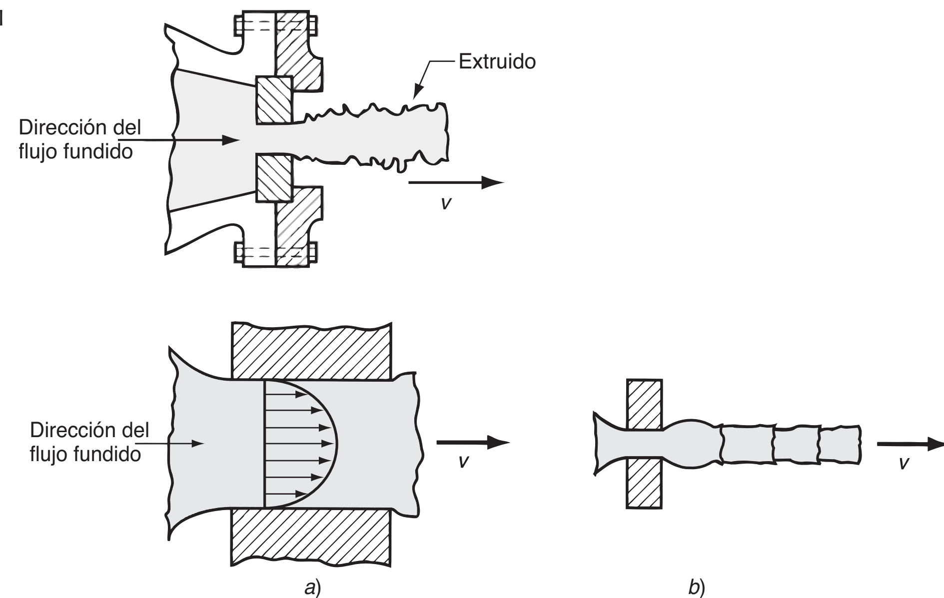


FIGURA 13.12 Fractura del fundido ocasionada por el flujo turbulento del líquido a través de una entrada del troquel que se reduce en forma abrupta.

FIGURA 13.13 *a*) Perfil de velocidad del fundido conforme pasa a través de la abertura del troquel, lo que lleva a defectos llamados piel de tiburón y *b*) bambú.

13.3 PRODUCCIÓN DE HOJAS Y PELÍCULA

Las hojas (láminas) y películas de termoplástico se producen por medio de varios procesos; los más importantes son dos métodos que se basan en la extrusión. El término ***hoja*** se refiere a material cuyo espesor es de 0.5 mm (0.020 in) de alrededor de 12.5 mm (0.5 in), y se usa para productos como recubrimientos para ventanas y materiales para termoformados (sección 13.9). El término ***película*** se refiere a espesores por debajo de 0.5 mm (0.020 in). Las películas delgadas se usan para empacar (material para envolver productos) bolsas para abarrotes y basura); las aplicaciones de película más gruesa incluyen cubiertas y forros (cubiertas para albercas y para canales de irrigación).

Todos los procesos que se estudian en esta sección son operaciones continuas de producción elevada. Más de la mitad de las películas que se producen hoy día son de polietileno, la mayor parte PE de baja densidad. Los demás materiales principales son el polipropileno, cloruro de polivinilo y celulosa regenerada (celofán). Todos éstos son polímeros termoplásticos.

Extrusión de hoja y película con troquel de rendija Se producen hojas y películas de espesores diversos por medio de extrusión convencional, con el uso de una rendija angosta como abertura del troquel. Ésta puede medir hasta 3 m (10 ft) de ancho y ser tan angosta como 0.4 mm (0.015 in). En la figura 13.14 se ilustra una configuración posible del troquel. Éste incluye un colector que distribuye el polímero en forma lateral antes de que fluya a través de la rendija (el orificio del troquel). Una de las dificultades de este método de extrusión es la uniformidad del espesor a todo lo ancho del material. Esto se debe al cambio drástico de forma que experimenta el polímero fundido durante su flujo a través del troquel, y a las variaciones de la temperatura y presión en éste. Por lo general, las aristas de la película deben recortarse debido al engrosamiento que ahí ocurre. Para ayudar a compensar estas variaciones, los troqueles incluyen bordes ajustables (que no se muestran en el diagrama) que permiten que el ancho de la rendija se modifique.

Para lograr tasas altas de producción, debe integrarse al proceso de extrusión un método eficiente de enfriamiento y captura de la película. Por lo general, esto se hace dirigiendo de inmediato el material extruido hacia una tina de agua o hacia rodillos gélidos, como se muestra en la figura 13.15. El método de los rodillos helados parece tener más importancia comercial. En contacto con los rodillos fríos, el extruido se enfría y solidifica con rapidez; en efecto, el extrusor sirve como dispositivo alimentador para los rodillos fríos que en realidad dan forma a la película. El proceso es notable por sus velocidades muy altas de producción: 5 m/s (1 000 ft/min). Además, es posible alcanzar tolerancias estrechas para el espesor de la película. Debido al método de enfriamiento que se usa en este proceso, se le conoce como ***extrusión con rodillo frío.***

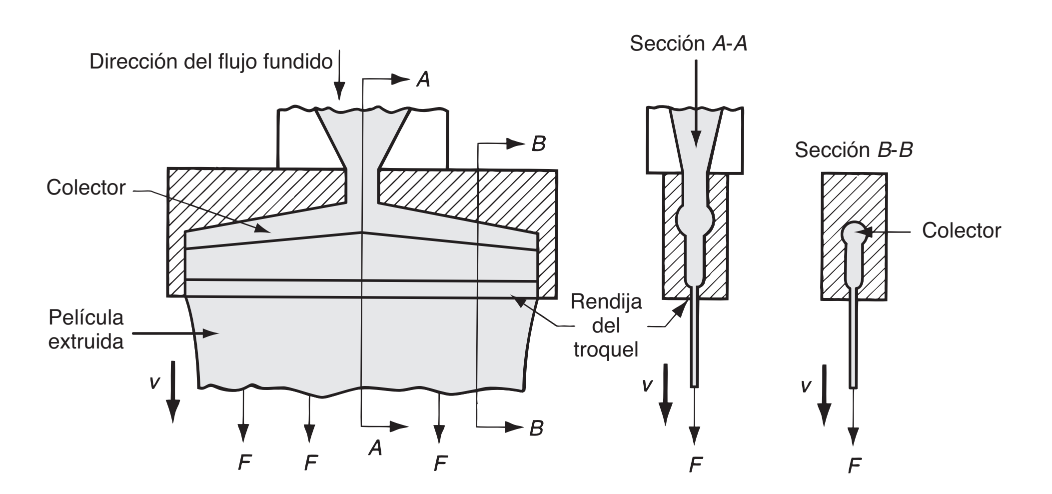


FIGURA 13.14 Una de varias configuraciones de troquel para extruir hojas y películas.

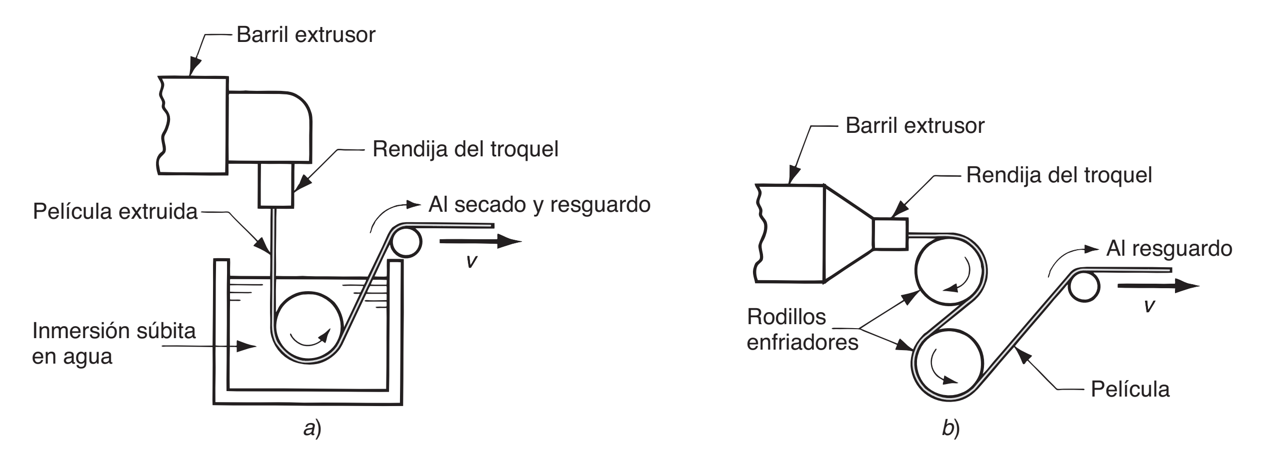
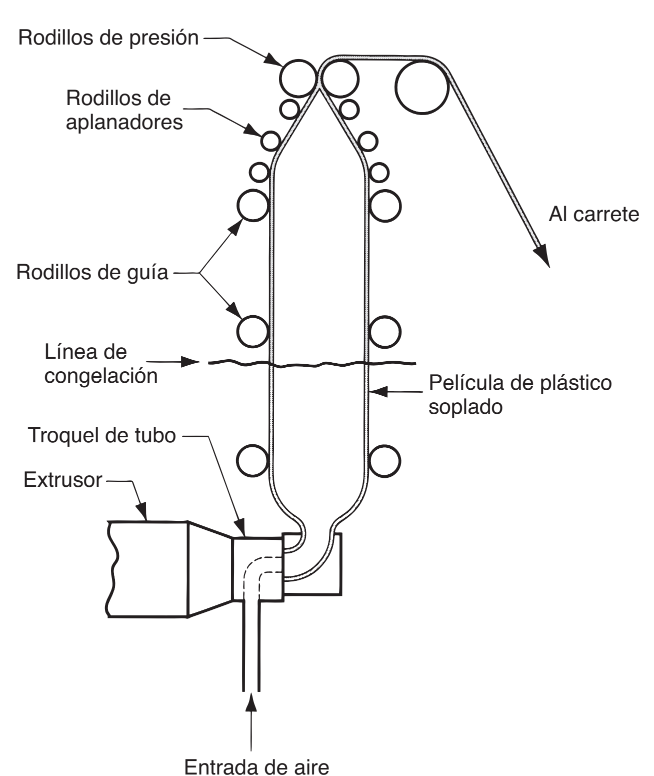


FIGURA 13.15 Uso de *a*) inmersión súbita en agua o *b*) rodillos fríos, para lograr la solidificación rápida de la película fundida después de la extrusión.

Proceso de extrusión de película soplada Éste es el otro proceso muy usado para hacer película delgada de polietileno para empaque. Es un proceso complejo que combina la extrusión y el soplado para producir un tubo de película delgada; se explica mejor con referencia al diagrama de la figura 13.16. El proceso comienza con la extrusión de un tubo que se jala de inmediato hacia arriba mientras aún está fundido, y se expande en forma simultánea por medio de aire que entra a su interior a través del mandril del troquel. Una "línea de congelación" marca la posición en que ocurre la solidificación del polímero de la burbuja que asciende. La presión del aire en la burbuja debe permanecer constante para mantener uniforme el espesor de la película y el diámetro del tubo. El aire es contenido en el tubo por medio de rodillos de presión que lo exprimen una vez que se ha enfriado. Los rodillos de guía y los de aplanado también se utilizan para fijar el tubo soplado y dirigirlo hacia los rodillos de presión. Luego se colecta el tubo plano en un carrete.

FIGURA 13.16 Proceso de película soplada para la producción a gran escala de película tubular delgada.



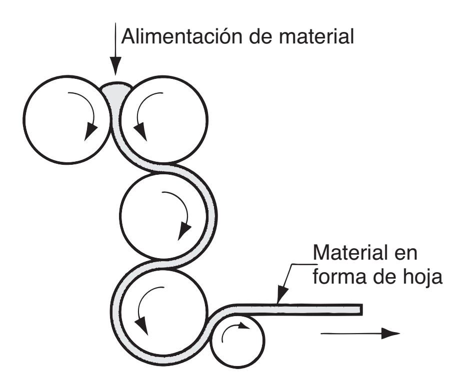


FIGURA 13.17 Configuración común de rodillos en el calandrado.

El efecto del inflado por aire es estirar la película en ambas direcciones conforme se enfría desde su estado fundido. Esto da como resultado propiedades isotrópicas de resistencia, lo que es una ventaja sobre otros procesos en los que el material primero se estira en una dirección. Otras ventajas incluyen la facilidad con la que pueden cambiarse la tasa de extrusión y la presión del aire para controlar el ancho y espesor del material. Si se compara este proceso con la extrusión por troquel de rendija, el método de la película soplada produce una película más resistente (de modo que puede usarse una película más delgada para empacar un producto), pero el control del espesor y las tasas de producción son menores. La película soplada final puede almacenarse en forma tubular (por ejemplo para bolsas de basura) o cortarse después por las orillas a fin de obtener dos películas delgadas paralelas.

Calandrado Éste es un proceso para producir hojas y películas a partir de caucho (sección 14.14) o termoplásticos tipo caucho tales como el PVC plastificado. En el proceso, el material inicial pasa por una serie de rodillos que lo trabajan y que reducen su espesor a la medida deseada. En la figura 13.17 se presenta un arreglo común. El equipo es caro, pero la tasa de producción es alta; es posible alcanzar velocidades que se acercan a 2.5 m/s (500 ft/min). Se requieren controles cercanos de las temperaturas, presiones y velocidad rotacional de los rodillos. El proceso es notable por el buen acabado de las superficies y por la exactitud alta de las medidas de la película. Los productos de plástico elaborados con el proceso de calandrado incluyen cubiertas de PVC para pisos, cortinas para baño, manteles de vinilo, cubiertas para albercas, lanchas y juguetes inflables.

13.4 PRODUCCIÓN DE FIBRAS Y FILAMENTOS (HILADO O HILANDERÍA)

La aplicación más importante de las fibras y filamentos se da en los textiles. Su uso como materiales de refuerzo de los plásticos (compuestos) es una aplicación que va en aumento, pero aún es pequeña en comparación con los textiles. Una ***fibra*** se define como una banda larga y delgada de material cuya longitud es al menos 100 veces mayor que la dimensión de su sección transversal. Un ***filamento*** es una fibra de longitud continua.

Las fibras son naturales o sintéticas. Las sintéticas constituyen alrededor de 75% del mercado de fibras actual, de las que el poliéster es la más importante, seguido por naylon, acrílico y rayón. Las fibras naturales constituyen cerca de 25% del total producido, con el algodón en el lugar más importante, por mucho (la producción de lana es significativamente menor que la de algodón).

El término ***hilado*** agrupa los métodos que se emplean para obtener y tejer las fibras naturales en hilos o hebras. En la producción de fibras sintéticas, el término se refiere al proceso de extruir un polímero fundido o solución a través de una ***hilera*** (troquel con muchos agujeros pequeños) para hacer los filamentos, los que luego se extraen y enrollan en una ***bobina***. Hay tres principales variantes en la torsión de fibras sintéticas, dependiendo del polímero que se procese: 1) hilado fundido, 2) hilado seco y 3) hilado húmedo.

El ***hilado fundido*** se emplea cuando el polímero de inicio se procesa mejor si se calienta hasta fundirlo y se bombea a través de la hilera, en forma muy parecida a la extrusión convencional. Una hilera común mide 6 mm (0.25 in) de espesor y contiene aproximadamente 50 agujeros con diámetro de 0.25 mm (0.010 in); los agujeros están abocardados, de modo que la abertura resultante tiene una razón L/D de sólo 5/1 o menos. Los filamentos que salen del troquel se jalan y en forma simultánea se enfrían con aire antes de ponerlos juntos y enrollarlos en la bobina, como se ilustra en la figura 13.18. Mientras el polímero aún se encuentra fundido, tiene lugar una extensión y adelgazamiento significativos del filamento, de modo que el diámetro final del que se enrolla en la bobina puede ser de sólo 1/10 del tamaño que se extruye. El hilado fundido se utiliza para el poliéster y naylon; toda vez que éstas son las fibras sintéticas más importantes; el hilado fundido es el más importante de los tres procesos para elaborar fibras sintéticas.

En el ***hilado seco***, el polímero de inicio está en solución, y el solvente se separa por evaporación. El extruido se jala a través de una cámara caliente que elimina el solvente; por otro lado, la secuencia es similar a la anterior. Las fibras de acetato de celulosa y acrílico se producen con este proceso. En el ***hilado húmedo***, el polímero también está en solución, sólo que el solvente no es volátil. Para separar al polímero, debe pasarse al extruido a través de un producto químico líquido que coagula o precipita al polímero en bandas coherentes que luego se colocan en bobinas. Este método se emplea para producir rayón (fibras de celulosa regeneradas).

Los filamentos producidos con cualquiera de los tres procesos por lo general están sujetos a un estirado adicional en frío para alinear la estructura cristalina a lo largo de la dirección del eje del filamento. Son extensiones comunes de 2 a 8 [13]. Esto tiene el efecto

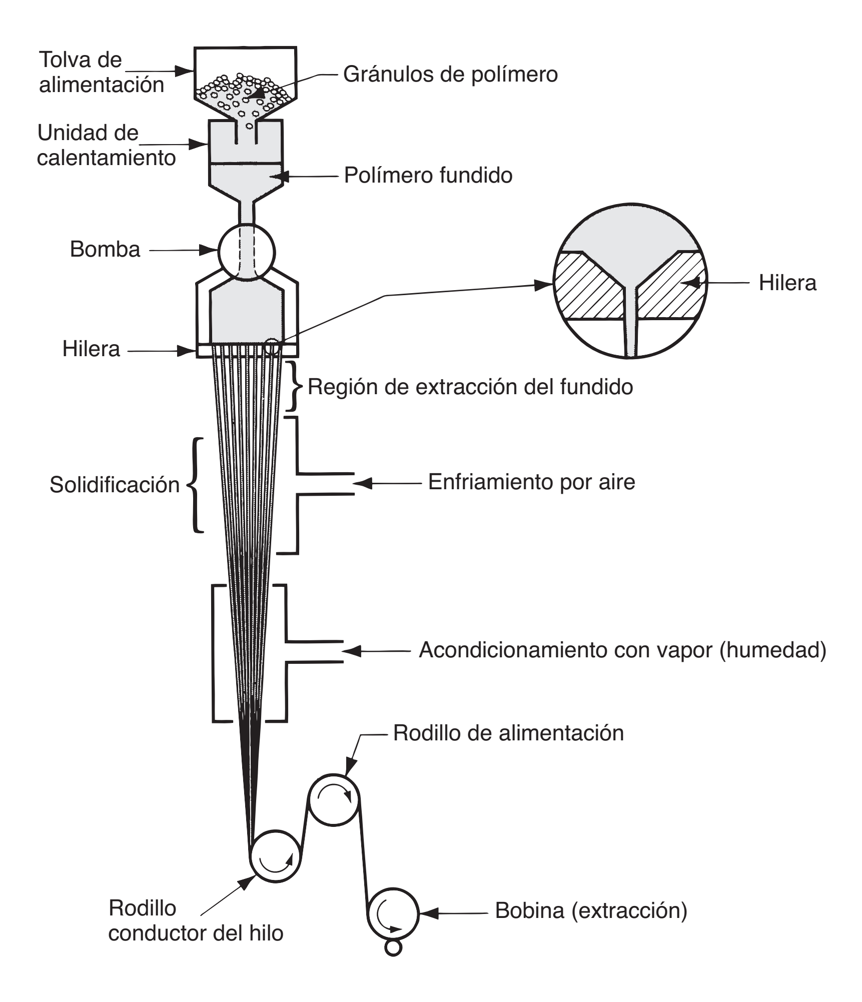


FIGURA 13.18 Hilado fundido de filamentos continuos.

de incrementar en forma significativa la resistencia a la tensión de las fibras. La extracción se lleva a cabo tirando del hilo entre dos carretes, de los que el que enrolla se mueve a velocidad mayor que el que se desenrolla.

13.5 PROCESOS DE RECUBRIMIENTO

El recubrimiento con plástico (o caucho) involucra la aplicación de una capa del polímero dado sobre un material que es el sustrato. Se observan tres categorías [6]: 1) recubrimiento de alambre y cable; 2) recubrimiento plano, que involucra recubrir una película plana; y 3) recubrimiento de contorno, que cubre un objeto tridimensional. Ya se estudió el recubrimiento de alambre y cable (sección 13.2.3); se trata en lo básico de un proceso de extrusión. Las otras dos categorías se analizan en los párrafos que siguen. Además, se encuentra la tecnología para aplicar pinturas, barnices, lacas y otros recubrimientos similares (sección 29.5).

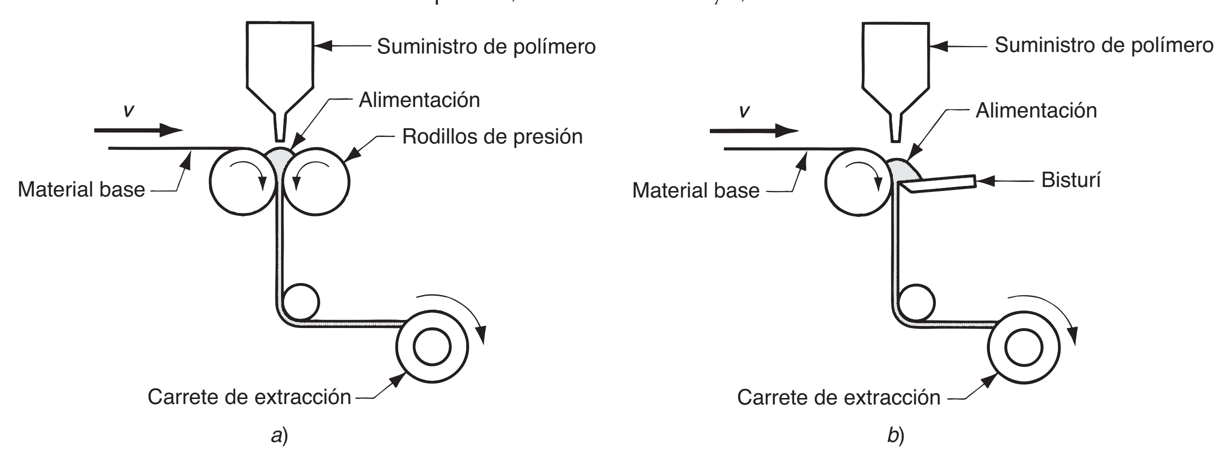
El ***recubrimiento plano*** se emplea para cubrir telas, papel, tableros y hojas de metal; estos artículos son productos principales para ciertos plásticos. Los polímeros importantes incluyen polietileno y polipropileno, con aplicaciones menores para el naylon, PVC y poliéster. En la mayoría de casos, el recubrimiento mide sólo de 0.01 a 0.05 mm (0.0005 a 0.002 in) de espesor. En la figura 13.19 se ilustran las dos técnicas principales de recubrimiento plano. En el ***método del rodillo,*** se exprime el material de polímero para recubrir, contra el sustrato, por medio de rodillos opuestos. Con el ***método del bisturí***, un cuchillo afilado controla la cantidad de polímero fundido con que se recubre al sustrato. En ambos casos, el material de recubrimiento se suministra ya sea con un proceso de extrusión con troquel de rendija o por calandrado.

El ***recubrimiento de contorno*** de objetos tridimensionales se lleva a cabo por inmersión o rociado. La ***inmersión*** consiste en sumergir el objeto en un baño apropiado de polímero o solución fundidos, seguido de enfriamiento o secado. El ***rociado*** (como la pintura en rocío) es un método alternativo para aplicar recubrimiento de polímero a un objeto sólido.

13.6 MOLDEO POR INYECCIÓN

El ***moldeo por inyección*** es un proceso con el que se calienta un polímero hasta que alcanza un estado muy plástico y se le fuerza a que fluya a alta presión hacia la cavidad de

FIGURA 13.19 Procesos de recubrimiento plano: *a*) método del rodillo y *b*) método del bisturí.



un molde, donde se solidifica. Entonces, la pieza moldeada, llamada ***moldeo***, se retira de la cavidad. El proceso produce componentes discretos que casi siempre son de forma neta. Es común que el ciclo de producción dure de 10 a 30 segundos, aunque no son raros ciclos de un minuto o más. Asimismo, el molde puede contener más de una cavidad, de modo que en cada ciclo se producen molduras múltiples. En el video clip se ilustran muchos aspectos del moldeo por inyección.

Es posible obtener formas complejas e intrincadas con el moldeo por inyección. El reto en esos casos es fabricar un molde cuya cavidad tenga la misma forma que la pieza, y que también permita el retiro de ésta. El tamaño de la pieza varía de alrededor de 50 g (2 oz) hasta 25 kg (más de 50 libras); el límite superior está representado por componentes tales como puertas de refrigerador y defensas de autos. El molde determina la forma y el tamaño de la pieza, y es la herramienta especial en el moldeo por inyección. Para piezas complejas y grandes, el molde llega a costar cientos de miles de dólares. Para piezas pequeñas, el molde se puede construir para que contenga cavidades múltiples, lo que también hace que sea caro. Así, el moldeo por inyección es económico sólo para cantidades grandes de producción.

El moldeo por inyección es el proceso que más se usa para los termoplásticos. Algunos termofijos y elastómeros se moldean por inyección, con modificaciones en el equipo y parámetros de operación, a fin de permitir el entrecruzamiento de estos materiales. En la sección 13.6.6 se estudian éstas y otras variaciones del moldeo por inyección.

13.6.1 Proceso y equipo

El equipo para moldeo por inyección evolucionó a partir de la fundición con troquel (Nota histórica 13.1). En la figura 13.20 se presenta una máquina grande de moldeo por inyección. Como se ilustra en el esquema de la figura 13.21, una máquina de moldeo por inyección consta de dos componentes principales: 1) la unidad de inyección de plástico y 2) la unidad de sujeción del molde. La ***unidad de inyección*** es muy parecida a un extrusor. Consiste en un barril al que se alimenta desde un extremo por una tolva que contiene un suministro de pellets de plástico. Dentro del barril hay un tornillo cuya operación sobrepasa la del tornillo extrusor en el siguiente aspecto: además de girar para mezclar y calentar el polímero, también actúa como martinete que se mueve con rapidez hacia delante para inyectar plástico fundido al molde. Una válvula sin retorno montada cerca de la punta del tornillo impide que el fundido fluya hacia atrás a lo largo de las cuerdas de aquél. En una etapa posterior del ciclo de moldeo, el martinete vuelve a su posición original. Debido a su acción dual, se denomina ***tornillo reciprocante***, nombre que también identifica el tipo de máquina. Las máquinas antiguas de moldeo por inyección usaban un martinete simple (sin cuerdas de tornillo), pero la superioridad del diseño del tornillo recíproco ha llevado a que se adopte con amplitud en las plantas de moldeo de hoy día. En resumen, las funciones de la unidad de inyección son fundir y homogeneizar el polímero, y luego se inyecta en la cavidad del molde.

La ***unidad de sujeción*** se relaciona con la operación del molde. Sus funciones son 1) mantener las dos mitades del molde alineadas en forma correcta una con otra, 2) mantener cerrado al molde durante la inyección, por medio de la aplicación de una fuerza que lo sujeta lo suficiente para resistir la fuerza de inyección y 3) abrir y cerrar el molde en los momentos apropiados del ciclo de inyección. La unidad de abrazadera consiste en dos placas, una fija y otra móvil, y un mecanismo para mover ésta. El mecanismo básicamente es una prensa de potencia que funciona por medio de un pistón hidráulico o dispositivos de palanca mecánica de varios tipos. Las máquinas grandes disponen de fuerzas de abrazadera de varios miles de toneladas.

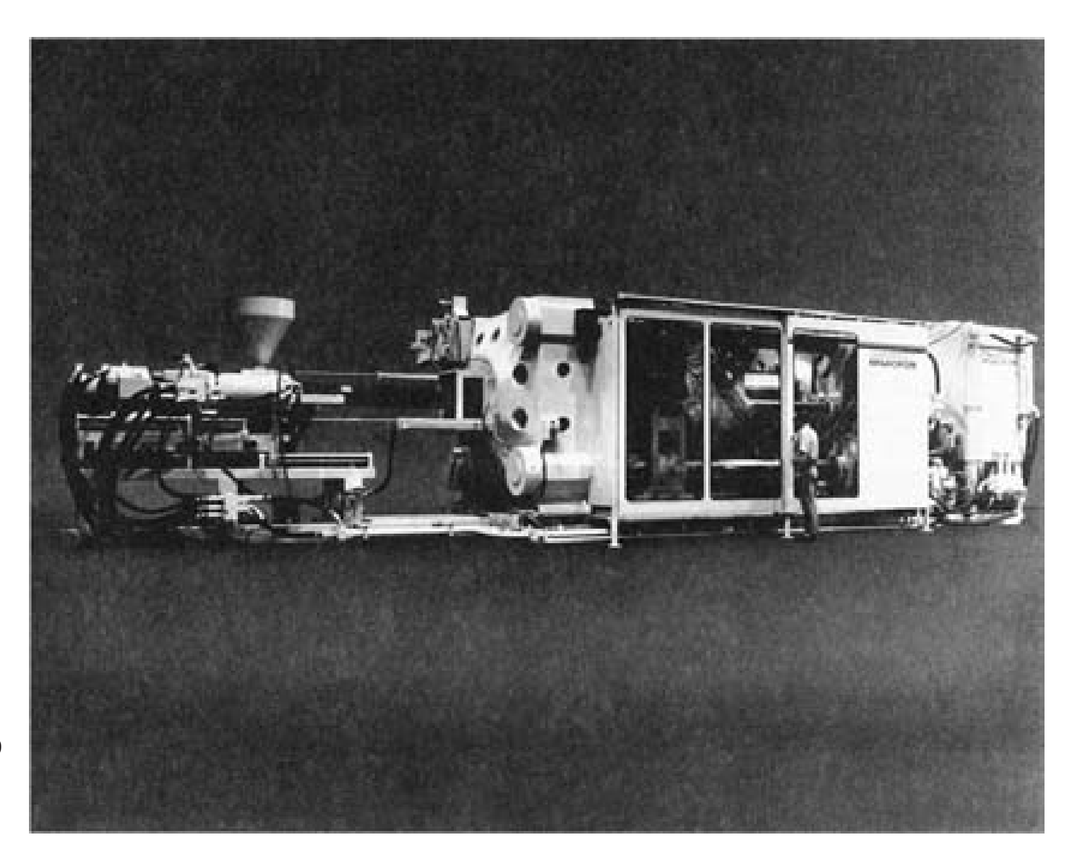
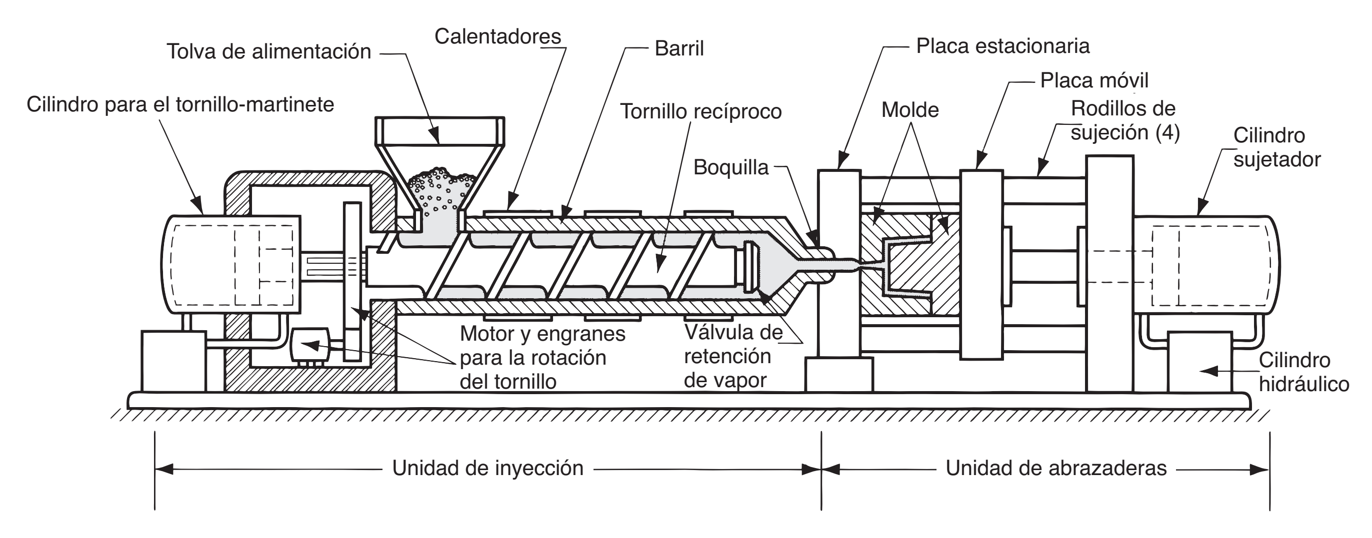


FIGURA 13.20 Máquina grande (capacidad de 3 000 toneladas) de moldeo por inyección. (Cortesía de Cincinnati Milacron.)

El ciclo para el moldeo por inyección de un polímero termoplástico procede en la siguiente secuencia, como se ilustra en la figura 13.22. La acción comienza con el molde abierto y la máquina lista para comenzar un nuevo moldeo: 1) el molde se cierra y se sujeta. 2) Se inyecta un ***disparo*** de fundido a alta presión hacia la cavidad del molde, el cual se ha puesto a la temperatura y viscosidad correctas por medio de calor y trabajo mecánico del tornillo. El plástico se enfría y comienza a solidificarse cuando se encuentra con la superficie fría del molde. Se mantiene la presión del martinete a fin de comprimir

FIGURA 13.21 Diagrama de una máquina de moldeo por inyección, del tipo de tornillo recíproco (se han simplificado algunos detalles mecánicos).



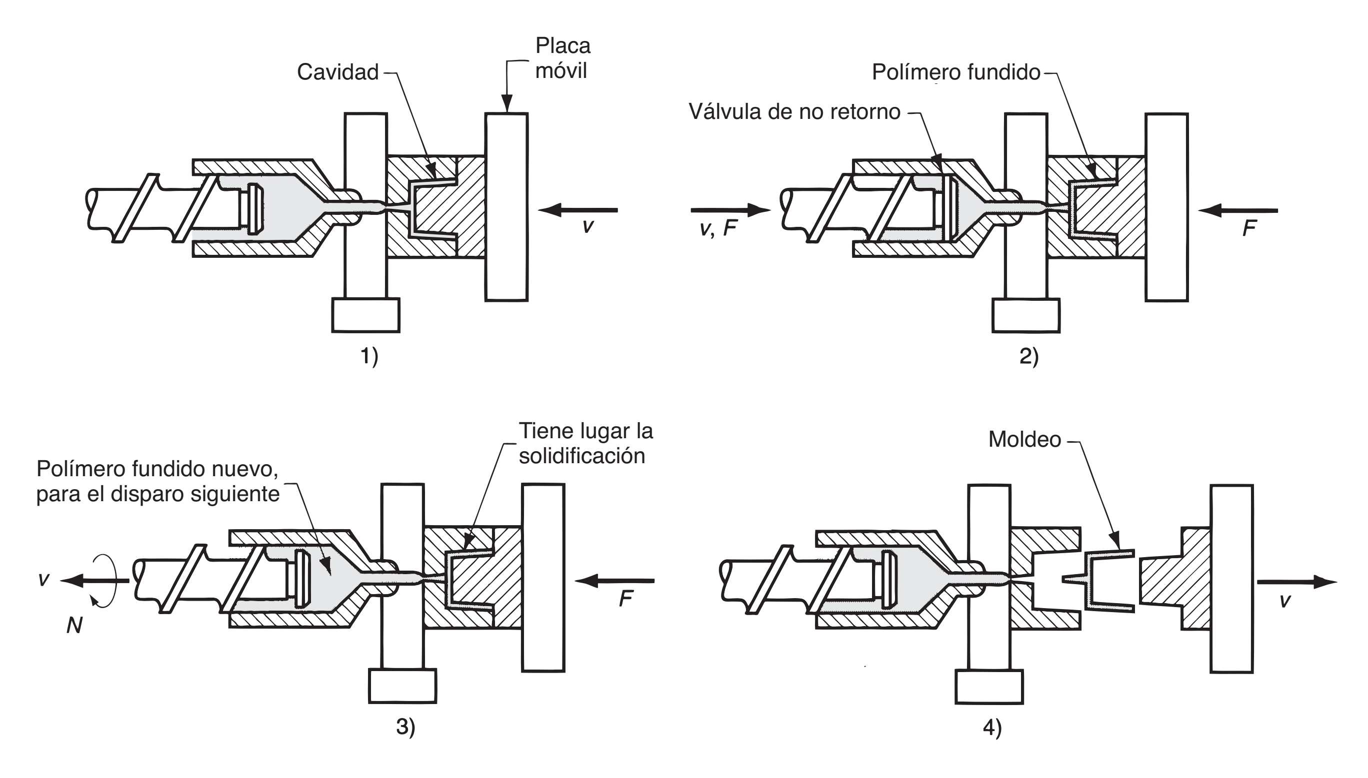


FIGURA 13.22 Ciclo común de moldeo: 1) molde cerrado, 2) se inyecta fluido a la cavidad, 3) se retrae el tornillo y 4) se abre el molde, y la pieza se expulsa.

más fundido en la cavidad para compensar la contracción durante el enfriamiento. 3) El tornillo gira y se retrae con la válvula de retención de vapor abierta para permitir que polímero nuevo fluya hacia la parte delantera del barril. Entre tanto, el polímero en el molde se ha solidificado por completo. 4) El molde se abre, y la pieza se expulsa y retira.

13.6.2 El molde

Es la herramienta especial en el moldeo por inyección; está diseñado sobre medida y se fabrica para la pieza específica que se ha de producir. Cuando termina la corrida de producción de esa pieza, el molde se reemplaza por otro para la pieza siguiente. En esta sección se estudian varios tipos de molde para inyección.

Molde de dos placas En la figura 13.23 se ilustra el ***molde de dos placas*** convencional, que consiste en dos mitades unidas a las dos placas de la unidad de abrazaderas de la máquina moldeadora. Cuando la unidad de abrazaderas se abre, también lo hacen las dos mitades del molde, como se ilustra en *b*). El rasgo más notorio del molde es la ***cavidad***, que por lo general se forma con la extracción de metal de las superficies que se corresponden de las dos mitades. Los moldes pueden tener una cavidad o varias, a fin de producir más de una pieza en un solo disparo. La figura muestra un molde con dos cavidades. Las ***superficies de separación*** (o ***línea de separación***, en la vista transversal del molde) son aquéllas donde el molde se abre para retirar la(s) pieza(s).

Además de la cavidad, hay otros rasgos del molde que desempeñan funciones indispensables durante el ciclo del moldeo. Un molde debe tener canal de distribución por el que fluya el polímero fundido, de la boquilla del barril de inyección a la cavidad del

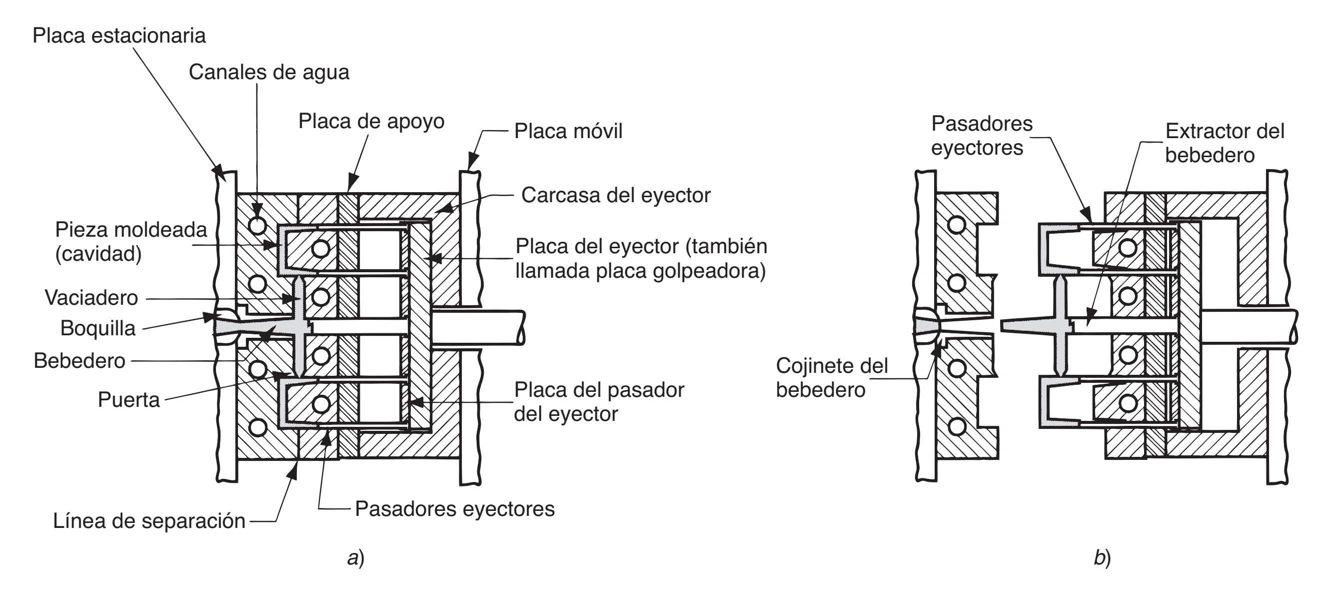


FIGURA 13.23 Detalles de un molde de dos placas para molde por inyección de termoplásticos: *a*) cerrado y *b*) abierto. El molde tiene dos cavidades para producir dos piezas en forma de copa (se muestra la sección transversal) con cada disparo de inyección.

molde. El canal distribuidor consiste en 1) un ***bebedero***, que va de la boquilla al molde; 2) ***vaciadores***, que van de la toma a la cavidad (o cavidades); y 3) ***puertas***, que restringen el flujo del plástico hacia la cavidad. Hay una o más puertas para cada cavidad del molde.

Es necesario un ***sistema de eyección*** para expulsar la pieza moldeada de la cavidad en el extremo del ciclo de moldeo. Por lo general, son los ***pasadores eyectores*** construidos en la mitad móvil del molde los que llevan a cabo esta función. La cavidad está dividida entre las dos mitades del molde de tal forma que la contracción natural del moldeo ocasiona que la pieza se adhiera a la mitad móvil. Cuando el molde se abre, los pasadores eyectores empujan la pieza fuera de la cavidad del molde.

Se requiere un ***sistema de enfriamiento*** para el molde. Éste consiste en una bomba externa conectada a pasajes en el molde, a través de los cuales circula agua para eliminar calor del plástico caliente. Debe evacuarse aire de la cavidad del molde conforme el polímero avanza. A través de los claros pequeños de los pasadores eyectores del molde pasa gran cantidad de aire. Además, es frecuente que se maquinen ***conductos de aire*** estrechos en la superficie de separación; de alrededor de 0.03 mm (0.001 in) de profundidad y 12 a 25 mm (0.5 a 1.0 in) de ancho, estos canales permiten que el aire escape hacia el exterior, pero son demasiado pequeños para que el polímero fundido viscoso fluya a través de ellos.

En resumen, un molde consiste en 1) una o más cavidades que determinan la forma de la pieza, 2) canales de distribución a través de los cuales el polímero fundido fluye a las cavidades, 3) un sistema de eyección para la remoción de la pieza, 4) un sistema de enfriamiento y 5) conductos para permitir la evacuación del aire de las cavidades.

Otros tipos de molde El de dos placas es el molde más común en el moldeo por inyección. Uno alternativo es el ***molde de tres placas***, que se ilustra en la figura 13.24, para la misma configuración geométrica de la pieza que antes. Este diseño de molde tiene ventajas. En primer lugar, el flujo de plástico fundido ocurre a través de una puerta ubicada en la base de la pieza con forma de taza, en vez de en un lado. Esto permite una distribución más pareja de fundido en los lados de la taza. En el diseño de puerta lateral del molde de dos placas de la figura 13.23, el plástico debe fluir alrededor del núcleo y unirse en el lado opuesto, posiblemente con la creación de una debilidad en la línea de soldadura. En segundo lugar, el molde de tres placas permite una operación más automática de la máquina moldeadora.

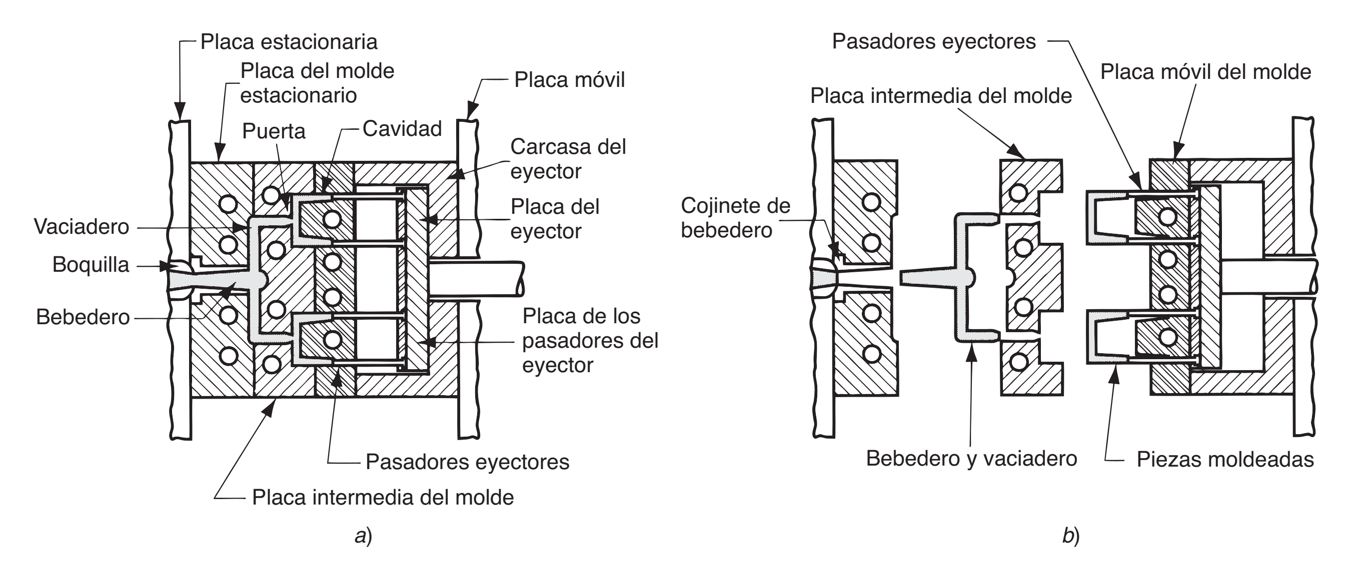


FIGURA 13.24 Molde de tres placas: *a*) cerrado y *b*) abierto.

Cuando el molde se abre, se divide en tres placas con dos aberturas entre ellas. Esto fuerza la desconexión de los vaciaderos y las piezas, que caen por gravedad (con la asistencia posible de aire soplado o un brazo robotizado) a diferentes contenedores por debajo del molde.

El bebedero y el vaciador de un molde convencional de dos o tres placas representan un desperdicio de material. En muchos casos se desechan y vuelven a usar; sin embargo, en otros, el producto debe hacerse de plástico "virgen" (aquel que no ha sido moldeado antes). El ***molde de vaciadero caliente*** elimina la solidificación del bebedero y del vaciadero por medio de la colocación de calentadores alrededor de los canales correspondientes del vaciadero. Mientras que el plástico en la cavidad del molde se solidifica, el material en el bebedero y canales del vaciadero permanece fundido, listo para inyectarse en la cavidad en el siguiente ciclo.

13.6.3 Máquinas de moldeo por inyección

Las máquinas de moldeo por inyección difieren tanto en la unidad de inyección como en la de sujeción. En esta sección se estudia los tipos importantes de máquinas de hoy día. El nombre de la máquina de moldeo por inyección por lo general se basa en el tipo de unidad inyectora que se emplea.

Unidades de inyección En la actualidad son dos tipos de unidades de inyección los que más se utilizan. La ***máquina de tornillo reciprocante*** (sección 13.6.1, figuras 13.21 y 13.22) es la más común. Este diseño emplea el mismo barril para la fundición e inyección del plástico. La unidad alternativa incluye el uso de barriles separados para plastificar e inyectar el polímero, como se aprecia en la figura 13.25*a*). Este tipo se denomina ***máquina preplastificadora de tornillo*** o ***máquina de dos etapas***. Desde la tolva se alimentan pellets de plástico hacia la primera etapa, que usa un tornillo para dirigir el polímero hacia delante y fundirlo. Este barril alimenta a otro que usa un pistón para inyectar el material fundido en el molde. Las máquinas más antiguas usaban un barril impulsado por pistón para fundir e inyectar el plástico. Estas máquinas se conocen como ***máquinas moldeadoras de inyección de tipo pistón***; véase la figura 13.25*b*).

Unidades de sujeción Los diseños de sujeción son de tres tipos [11]: de palanca, hidráulica e hidromecánica. La ***sujeción de palanca*** incluye varios diseños, uno de los cuales se ilustra en la figura 13.26*a*). Un actuador mueve la cruceta hacia delante, el que extiende

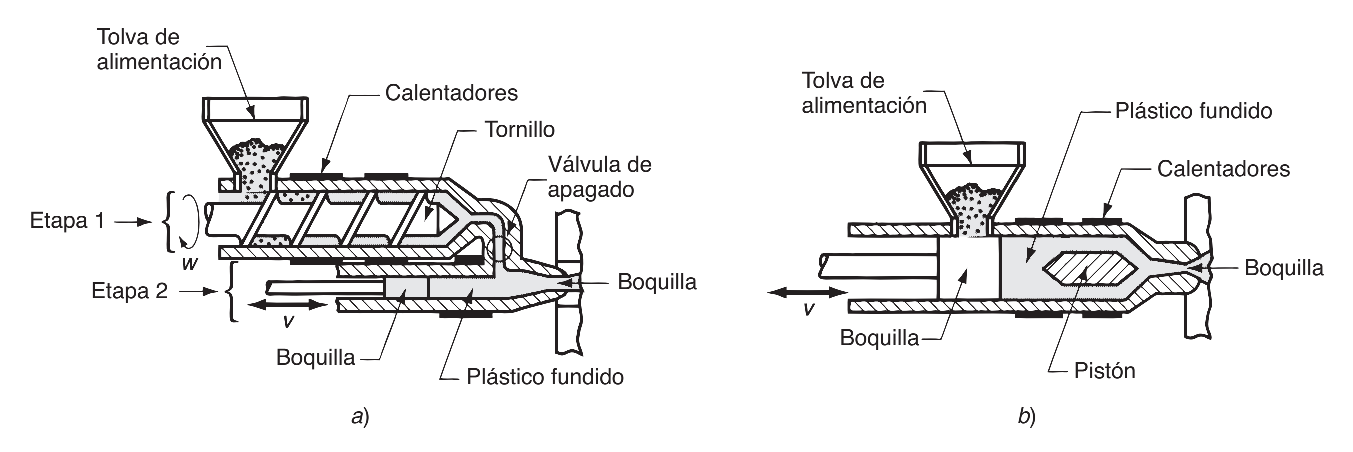


FIGURA 13.25 Dos sistemas de inyección alternativos al de tornillo recíproco que se presenta en la figura 13.21: *a*) preplastificador de tornillo y *b*) tipo pistón.

los eslabones de palanca para empujar las placas móviles en dirección de la posición cerrada. Al comenzar el movimiento, la ventaja mecánica es poca y la velocidad alta; pero cerca del extremo de la carrera, sucede lo contrario. Así, las abrazaderas de palanca proporcionan tanto gran velocidad como mucha fuerza en diferentes puntos del ciclo cuando se necesitan. Las proporcionan cilindros hidráulicos o tornillos impulsados por motores eléctricos. Las unidades de abrazaderas de palanca parecen más apropiadas a máquinas de tonelaje relativamente bajo. Las ***abrazaderas hidráulicas***, que se ilustran en la figura 13.26*b*), se emplean en máquinas moldeadoras de inyección de tonelaje elevado, por lo

FIGURA 13.26 Dos diseños de sujeción: *a*) un diseño posible de sujeción de palanca: 1) abierta y 2) cerrada y *b*) sujeción hidráulica: 1) abierta y 2) cerrada. No se muestran los rodillos de sujeción que guían la placa móvil.

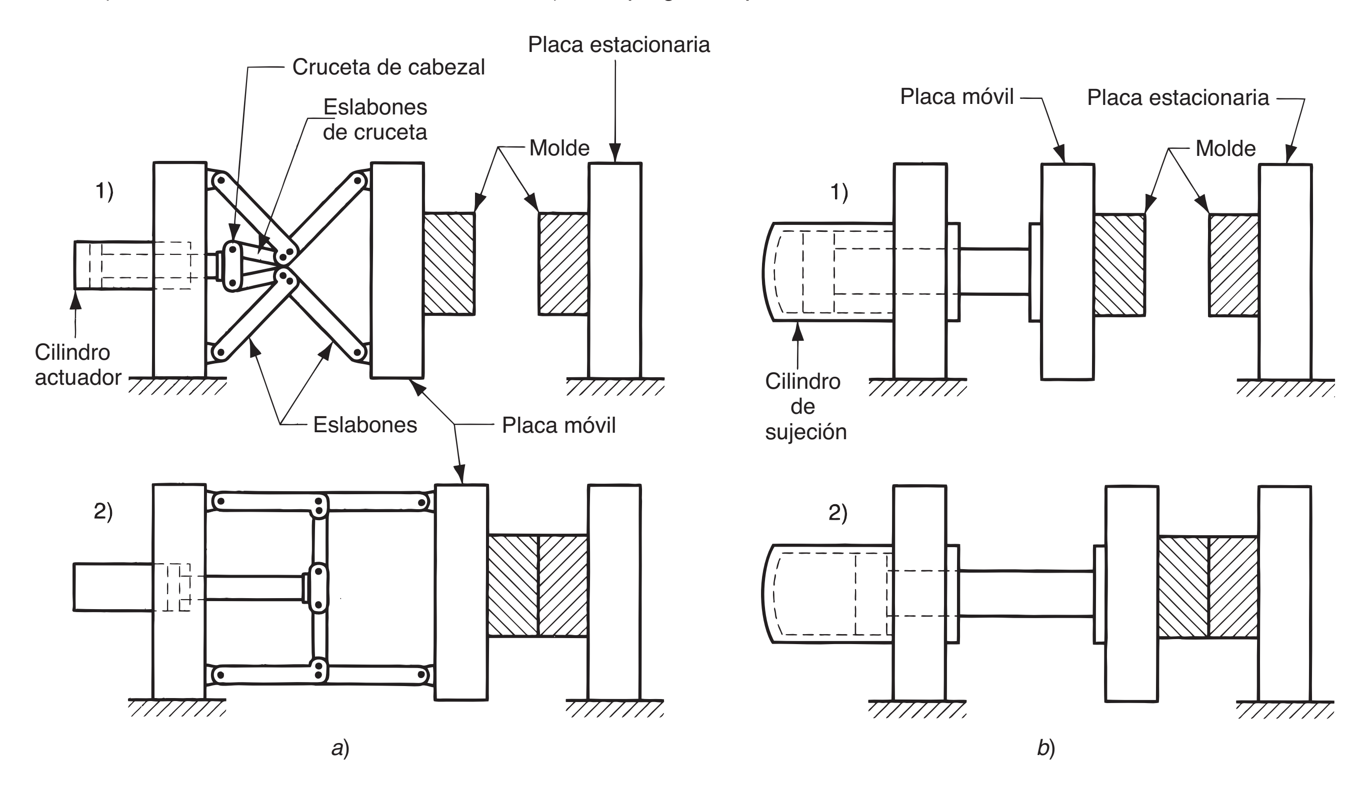


TABLA 13.1 Valores comunes de contracción para moldes de termoplásticos seleccionados.

Plástico	Contracción, mm/mm (in/in)
ABS	0.006
Nylon-6,6	0.020
Policarbonato	0.007
Polietileno	0.025
Poliestireno	0.004
PVC	0.005

Compilado de la referencia [14].

común en el rango de 1 300 a 8 900 kN (150 a 1 000 ton). Estas unidades también son más flexibles que las abrazaderas de palanca, en términos de fijar el tonelaje en posiciones dadas durante la carrera. Las ***abrazaderas hidrodinámicas*** están diseñadas para tonelajes grandes, por lo general por arriba de 8 900 kN (1 000 ton); operan con 1) el uso de cilindros hidráulicos para mover con rapidez el molde hacia la posición de cerrado, 2) el cierre de la posición por medios mecánicos y 3) el empleo de cilindros hidráulicos de presión alta para, finalmente, cerrar el molde y almacenar el tonelaje.

13.6.4 Contracción

Los polímeros tienen coeficientes de expansión térmica elevados, y durante el enfriamiento del plástico en el molde ocurre una contracción significativa. Algunos termoplásticos sufren una contracción volumétrica de alrededor de 10% después de la inyección en el molde. La contracción de plásticos cristalinos tiende a ser mayor que para los polímeros amorfos. La contracción se expresa por lo general como la reducción en el tamaño lineal que ocurre durante el enfriamiento a temperatura ambiente a partir de la temperatura del molde para el polímero dado. Por ello, las unidades apropiadas son mm/mm (in/in) de la dimensión en estudio. En la tabla 13.1 se dan valores comunes para polímeros seleccionados.

Los rellenos en el plástico tienden a reducir la contracción. En la práctica comercial del moldeo, antes de hacer el molde debe obtenerse del productor los valores de la contracción para el compuesto específico por moldear. Con el fin de compensar la contracción, las dimensiones de la cavidad del molde deben hacerse más grandes que las de la pieza especificada. Puede usarse la fórmula siguiente [14]:

$$D_c = D_p + D_p S + D_p S^2 \qquad (13.19)$$

donde D_c = dimensiones de la cavidad, mm (in); D_p = dimensión de la pieza moldeada, mm (in); y S = valores de la contracción obtenidos de la tabla 13.1. El tercer término del lado derecho de la ecuación hace la corrección en la contracción.

Ejemplo 13.3 Contracción en el moldeo por inyección

La longitud nominal de una pieza hecha de polietileno ha de ser de 80 mm. Determine la dimensión correspondiente de la cavidad del molde que compensará la contracción.

Solución: De la tabla 13.1, la contracción para el polietileno es S = 0.025. Con el uso de la ecuación (13.19), el diámetro de la cavidad del molde debe ser:

$$D_c = 80.0 + 80.0(0.025) + 80.0(0.025)^2$$
$$= 80.0 + 2.0 + 0.05 = \mathbf{82.05\ mm}$$

Queda claro que deben determinarse las dimensiones del molde para el polímero en particular que habrá de moldearse. El mismo molde producirá tamaños de pieza diferentes para distintos tipos de polímero.

Los valores de la tabla 13.1 representan una simplificación grande del tema de la contracción. En realidad, ésta se ve afectada por cierto número de factores, cualquiera de los cuales altera la cantidad de contracción que experimenta un polímero dado. Los factores más importantes son la presión de la inyección, tiempo de compactación, temperatura del moldeo y espesor de la pieza. Conforme se incrementa la presión de la inyección y se fuerza a que entre más material en la cavidad del molde, la contracción se reduce. El incremento del tiempo de compactación tiene un efecto similar, si se supone que el polímero en la puerta no se solidifica ni sella la cavidad; el mantener la presión fuerza a que más material entre a la cavidad mientras ocurre la contracción. Por tanto, la contracción neta disminuye.

La temperatura de moldeo se refiere a la que tiene el polímero en el cilindro, inmediatamente antes de la inyección. Se esperaría que una temperatura más alta del polímero incrementaría la contracción, con el razonamiento de que la diferencia entre las temperaturas de moldeo y ambiental es mayor. Sin embargo, la contracción en realidad es menor con temperaturas de moldeo más elevadas. La explicación es que las temperaturas más altas disminuyen de manera significativa la viscosidad del polímero fundido, lo que permite que se compacte más material dentro del molde; el efecto es el mismo para presiones de inyección más grandes. Así, el efecto sobre la viscosidad más que compensa la mayor diferencia de temperaturas.

Por último, las piezas más gruesas presentan más contracción. Un molde se solidifica a partir del exterior; el polímero en contacto con la superficie del molde forma una capa que crece hacia el centro de la pieza. En cierto punto de la solidificación, la puerta se solidifica, lo que aísla al material de la cavidad del sistema del vaciadero y de la presión de compactación. Cuando esto ocurre, el polímero fundido dentro de la cáscara representa la mayor parte de la contracción restante que ocurre en la pieza. Una sección más gruesa de ésta experimenta una contracción mayor, debido a que contiene una proporción más grande de material fundido.

13.6.5 Defectos en el moldeo por inyección

El moldeo por inyección es un proceso complicado, y son muchas las cosas que pueden salir mal. A continuación se mencionan defectos comunes de las piezas moldeadas por inyección:

- ***Disparos cortos:*** Igual que en el fundido, un disparo corto es un moldeo que se solidifica antes de que la cavidad se llene por completo. El defecto se corrige si se incrementa la temperatura y/o la presión. El defecto también surge por el uso de una máquina con capacidad de disparo insuficiente, caso en el que es necesario un aparato más grande.
- ***Rebabas:*** Las salpicaduras ocurren cuando el polímero fundido se escurre por la superficie de separación, entre las placas del molde; también sucede alrededor de los pasadores de inyección. Por lo general, el defecto lo ocasionan 1) conductos y claros demasiado grandes en el molde, 2) presión de inyección demasiado alta en comparación con la fuerza de sujeción, 3) temperatura de fusión demasiado elevada o 4) tamaño excesivo del disparo.
- ***Marcas de hundimiento y vacíos:*** Éstos son defectos que por lo general se relacionan con secciones moldeadas gruesas. Una ***marca de hundimiento*** ocurre cuando la superficie exterior del molde se solidifica, pero la contracción del material del interior hace que la capa se reduzca por debajo del perfil que se planeaba. Un ***vacío*** es ocasionado por el mismo fenómeno básico; sin embargo, el material de la superficie conserva su forma y la contracción se manifiesta como un vacío interno debido a fuerzas de tensión grandes sobre el polímero que aún está fundido. Estos defectos se eliminan con el incremento de la presión de compactación posterior a la inyección. Una mejor solución consiste en diseñar la pieza para tener espesor uniforme de la sección, y utilizar secciones más delgadas.
- ***Líneas de soldadura:*** Las líneas de soldadura ocurren cuando el polímero fundido fluye alrededor de un núcleo o de otro detalle convexo en la cavidad del molde, y se encuentra desde direcciones opuestas; la frontera así formada se denomina línea de soldadura, y tiene propiedades mecánicas inferiores a las del resto de la pieza. Las formas de eliminar

este defecto son las temperaturas de fundición más altas, presiones de inyección mayores, ubicaciones alternativas de la puerta de la pieza y mejores conductos.

13.6.6 Otros procesos del moldeo por inyección

La mayoría de las aplicaciones del moldeo por inyección involucran a los termoplásticos. En esta sección se describen algunas variaciones del proceso.

Moldeo por inyección de espuma termoplástica Las espumas de plástico tienen varias aplicaciones, y en la sección 13.11 se estudian dichos materiales y su procesamiento. Uno de los procesos, en ocasiones llamado ***moldeo de espuma estructural***, es apropiado que se estudie aquí porque se trata de moldeo por inyección. Involucra el moldeo de piezas de termoplástico que poseen una capa exterior densa que rodea a un centro de espuma ligera. Dichas piezas tienen razones de rigidez a peso apropiadas para las aplicaciones estructurales.

Una pieza de espuma estructural se produce ya sea con la introducción de gas en el plástico fundido en la unidad de inyección o con la mezcla de un ingrediente que produzca gas con los pellets de inicio. Durante la inyección, se fuerza dentro de la cavidad del molde una cantidad insuficiente de material fundido, donde se expande (espuma) y lo llena. Las celdas de la espuma en contacto con la superficie fría del molde se colapsan y forman una capa densa, en tanto que el material en el núcleo retiene su estructura celular. Los artículos hechos con espuma estructural incluyen estuches para electrónica, carcasas de máquinas para negocios, componentes de muebles y tanques para lavadoras. Las ventajas citadas del moldeo de espuma estructural incluyen presiones de inyección y fuerzas de sujeción más bajas, con lo que se está en capacidad de producir componentes grandes, como lo sugiere la lista anterior. Una desventaja del proceso es que las superficies resultantes de la pieza tienden a ser rugosas, con vacíos ocasionales. Si la aplicación necesitara un buen acabado de la superficie, entonces se requeriría procesamiento adicional, como lanzamiento de arena, pintura y la adhesión de un revestimiento.

Procesos de moldeo por inyección múltiple Es posible obtener efectos poco usuales por medio de la inyección múltiple de polímeros diferentes para moldear una pieza. Los polímeros se inyectan en forma simultánea o secuencial, y puede haber más de una cavidad de molde involucrada. Varios procesos caen en este rubro, todos caracterizados por dos o más unidades de inyección; así, el equipamiento para estos procesos es caro.

El ***moldeo en sándwich*** incluye la inyección de dos polímeros separados; uno constituye la capa externa de la pieza y la otra el núcleo interno, que es el caso común de una espuma de polímero. Una boquilla de diseño especial controla la secuencia de flujo de los dos polímeros dentro del molde. La secuencia está diseñada de modo que el polímero del núcleo quede rodeado por completo por el material de la capa exterior dentro de la cavidad del molde. La estructura final es similar a la de una espuma estructural. Sin embargo, la moldura posee una superficie suave, con lo que se evita una de las desventajas principales del proceso anterior. Además, consiste en dos plásticos distintos, cada uno de los cuales tiene características propias adecuadas para la aplicación.

Otro proceso de moldeo por inyección múltiple involucra la inyección secuencial de dos polímeros en un molde de dos posiciones. Con el molde en la primera posición, se inyecta el primer polímero en la cavidad. Después se abre el molde en la segunda posición y se inyecta el segundo en la cavidad agrandada. La pieza que resulta consiste en dos plásticos conectados en forma integral. El ***moldeo por inyección doble*** se utiliza para combinar plásticos de dos colores distintos (por ejemplo, cubiertas de las luces traseras de los automóviles) o para obtener propiedades diferentes en secciones distintas de la misma pieza.

Moldeo por inyección de termofijos Éste se emplea para plásticos termofijos (TS), con ciertas modificaciones del equipo y procedimiento de operación, a fin de permitir el entrecruzamiento. Éstas máquinas son similares a las que se emplean para termoplásticos. Utilizan una unidad de inyección de tornillo recíproco, pero la longitud del barril es más

corta para evitar la cura y solidificación prematuras del polímero TS. Por la misma razón, las temperaturas en el barril se mantienen a niveles relativamente bajos, por lo general de 50 ºC a 125 ºC (120 ºF a 260 ºF), lo que depende del polímero. El plástico, por lo general en forma de pellets o gránulos, se alimenta por medio de una tolva. La plastificación ocurre por la acción del tornillo rotatorio conforme el material se mueve hacia delante en dirección de la boquilla. Cuando se ha acumulado suficiente material fundido por delante del tornillo, se inyecta a un molde que se calienta entre 150 ºC y 230 ºC (300 ºF a 450 ºF), donde ocurre el entrecruzamiento para endurecer el plástico. Entonces se abre el molde y la pieza se eyecta y retira. Es común que los tiempos del ciclo de moldeo varíen en el rango de 20 segundos a 2 minutos, lo que depende del tipo de polímero y tamaño de la pieza.

La cura es la etapa del ciclo que más tiempo consume. En muchos casos, la pieza se retira del molde antes de que finalice la cura, de modo que el endurecimiento final sucede debido al calor conservado durante un minuto o dos después de retirarla. Un enfoque alternativo consiste en usar una máquina de molde múltiple, en el que se adjuntan dos o más moldes a una cabeza indizadora atendida por una sola unidad de inyección.

Los termofijos principales para el moldeo por inyección son los fenoles, poliésteres insaturados, melaminas, epóxicos y formaldehídos de urea. También los elastómeros se moldean por inyección (sección 14.1.4). Más de 50% de los moldeos de fenólicos que se producen en Estados Unidos se lleva a cabo con este proceso [11], lo que representa un abandono del moldeo por compresión y transferencia, procesos tradicionales que se utilizan para los termofijos (sección 13.7). La mayoría de los materiales del moldeo TS contienen grandes proporciones de rellenadores (hasta 70% de su peso), incluso fibras de vidrio, arcilla, fibras de madera y negro de humo. En efecto, éstos son materiales compuestos que se moldean por inyección.

Moldeo por inyección de reacción El ***moldeo por inyección de reacción*** (RIM, por sus siglas en inglés) involucra la mezcla de dos ingredientes líquidos muy reactivos, con la inyección inmediata de ésta en la cavidad de un molde, donde reacciones químicas hacen que ocurra la solidificación. Los dos ingredientes forman los componentes empleados en sistemas activados por catalizadores o por mezcla (sección 8.3.1). Los uretanos, epóxicos y formaldehídos de urea son ejemplos de estos sistemas. El RIM se desarrolló con el poliuretano para producir grandes componentes automotrices tales como defensas, alerones y salpicaderas. Esta clase de piezas constituye la aplicación principal del proceso. Es común que las piezas de poliuretano obtenidas con RIM posean una estructura interna de espuma rodeada por una capa exterior densa.

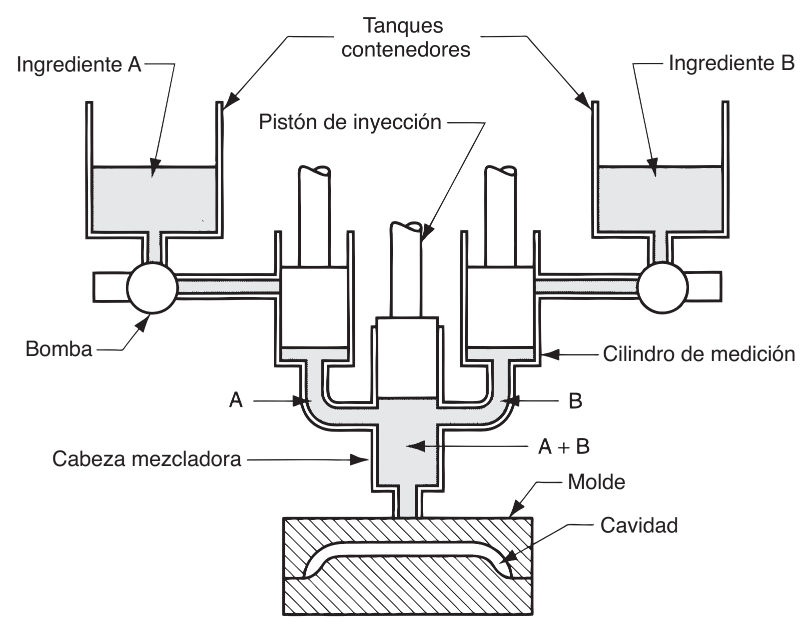


FIGURA 13.27 Sistema de moldeo por inyección de reacción (RIM), mostrado inmediatamente después de que los ingredientes A y B se han bombeado hacia la cabeza mezcladora, antes de inyectarlos a la cavidad del molde (se han omitido algunos detalles del equipo de procesamiento).

Como se aprecia en la figura 13.27, los ingredientes líquidos se bombean en cantidades medidas con precisión, desde tanques separados hacia una cabeza mezcladora. Los ingredientes se mezclan con rapidez y luego se inyectan a la cavidad del molde con una presión relativamente baja, donde ocurre la polimerización y cura. El tiempo normal de un ciclo es de alrededor de 2 minutos. Para cavidades relativamente grandes, los moldes para RIM son mucho menos costosos que los correspondientes al moldeo por inyección convencional. Esto se debe a las fuerzas pequeñas de las abrazaderas que se requieren en el RIM y a la oportunidad de utilizar componentes ligeros en los moldes.

Entre las ventajas del RIM están que 1) se requiere poca energía para el proceso, 2) los costos del equipo y molde son menores que los del moldeo por inyección, 3) se dispone de una variedad de sistemas químicos que permiten obtener propiedades específicas del producto moldeado y 4) el equipo de producción es confiable, los sistemas químicos y las relaciones de la máquina se comprenden bien [16].

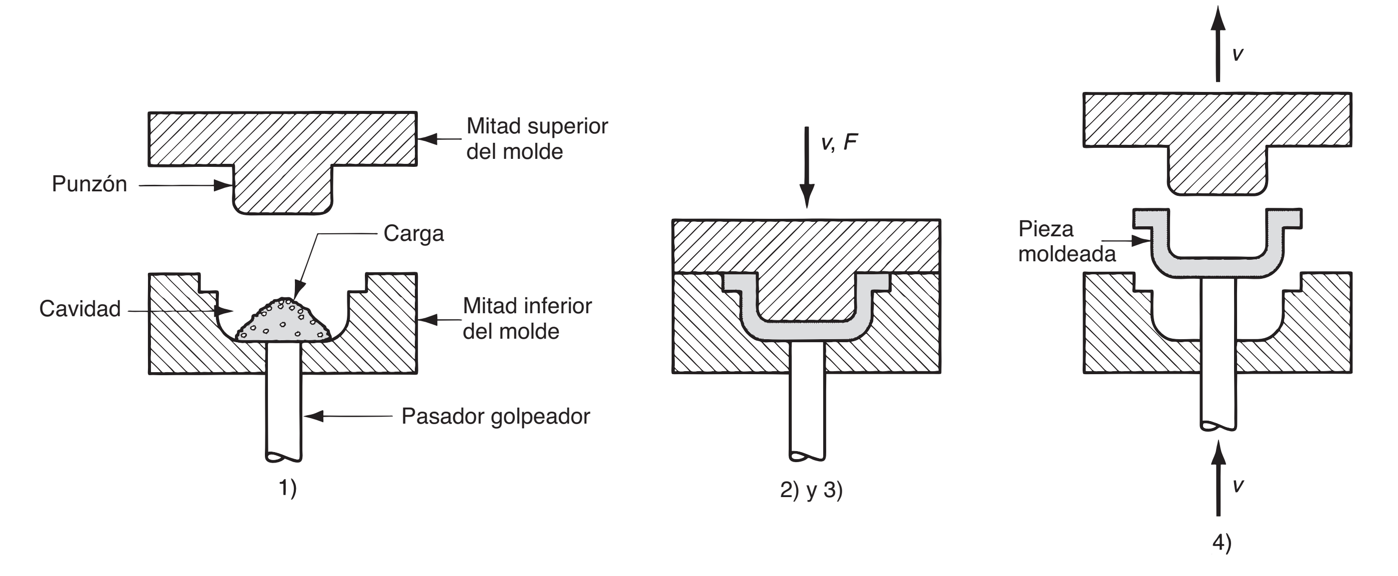
13.7 MOLDEO POR COMPRESIÓN Y TRANSFERENCIA

En esta sección se estudian dos técnicas que se emplean mucho para polímeros termofijos y elastómeros. Para los termoplásticos, estas técnicas no alcanzan la eficiencia del moldeo por inyección, excepto para aplicaciones muy especiales.

13.7.1 Moldeo por compresión

Es un proceso antiguo y muy utilizado para plásticos termofijos. Sus aplicaciones también incluyen discos de fonógrafo termoplásticos, llantas de caucho y varias piezas compuestas de matriz de polímero. El proceso, que se ilustra en la figura 13.28 para un plástico TS, consiste en 1) cargar la cantidad precisa del compuesto de moldeo, llamada ***carga***, en la mitad inferior de un molde calentado; 2) juntar las mitades del molde para comprimir la carga, forzarla a que fluya y adopte la forma de la cavidad; 3) calentar la carga por medio del molde caliente para polimerizar y curar el material en una pieza solidificada; y 4) abrir las mitades del molde y retirar la pieza de la cavidad.

FIGURA 13.28 Moldeo por compresión de plásticos termofijos: 1) se introduce la carga; 2) y 3) la carga se comprime y cura; y 4) la pieza se eyecta y retira (se han omitido algunos detalles).



La carga inicial del compuesto para el moldeo puede estar en varias formas, incluso polvo o pellets, líquida o preformada. La cantidad de polímero debe controlarse con precisión para obtener consistencia repetible en el producto moldeado. Se ha vuelto práctica común precalentar la carga antes de colocarla en el molde; esto suaviza al polímero y acorta la duración del ciclo de producción. Los métodos de precalentamiento incluyen calentadores infrarrojos, convección en un horno y uso de tornillo rotatorio caliente en un barril. La última técnica (tomada del moldeo por inyección) también se usa para medir la cantidad de la carga.

Las prensas para moldeo por compresión se orientan en forma vertical y contienen dos placas a las que se sujetan las mitades del molde. Las prensas involucran dos tipos de actuación: 1) ascenso de la placa inferior o 2) descenso de la placa superior; la primera es la configuración más común de la máquina. Por lo general, son movidas por un cilindro hidráulico diseñado para proporcionar capacidades de sujeción de varios cientos de toneladas.

Los moldes para moldeo por compresión generalmente son más sencillos que sus contrapartes para inyección. En un molde para compresión no hay sistema de bebedero y vaciadero y el proceso en sí, por lo general, está limitado a formas sencillas de la pieza, debido a las capacidades menores de flujo de los materiales termofijos con los que se inicia. Sin embargo, deben tomarse medidas para calentar el molde, que, por lo general, se lleva a cabo con resistencia eléctrica, vapor o circulación de aceite caliente. Los moldes para compresión se clasifican en ***moldes manuales***, que se emplean para hacer ensayos; ***semiautomáticos***, en los que la prensa sigue un ciclo programado, pero es el operador quien la carga y descarga en forma manual; y ***automáticos***, que operan con un ciclo de prensa totalmente automático (incluso para la carga y descarga).

Los materiales para moldeo por compresión incluyen fenoles, melamina, formaldehído de urea, epóxicos, uretanos y elastómeros. Las molduras comunes de plásticos TS incluyen conexiones eléctricas, sóckets y carcasas; manijas de trastos y vajillas. Las ventajas más notables del moldeo por compresión en dichas aplicaciones incluyen las siguientes: los moldes son más sencillos, menos caros y requieren poco mantenimiento; menor desperdicio y esfuerzos residuales bajos en las piezas moldeadas (lo que favorece el empleo de este proceso para piezas delgadas planas, como discos de fonógrafo). Una desventaja frecuente son las duraciones mayores del ciclo y, por tanto, tasas de producción menores que las del moldeo por inyección.

13.7.2 Moldeo por transferencia

En este proceso se introduce una carga termofija (preformada) a una cámara inmediatamente delante de la cavidad del molde, donde se calienta; después se aplica presión para forzar al polímero suavizado a fluir hacia el molde caliente en el que ocurre la cura. Hay dos variantes del proceso, que se ilustra en la figura 13.29: *a*) ***moldeo por transferencia de vasija***, en el que la carga se inyecta desde una "vasija" a través de un canal de mazarota vertical en la cavidad; y *b*) ***moldeo por transferencia de pistón***, en el que la carga se inyecta por medio de un pistón desde un depósito caliente a través de canales laterales hacia la cavidad del molde. En ambos casos, en cada ciclo se generan desperdicios en forma de material sobrante en la base del depósito y los canales laterales, llamado ***desecho***. Además, en la transferencia de vasija el bebedero constituye material que se desperdicia. Debido a que los polímeros son termofijos, los desechos no pueden recuperarse.

El moldeo por transferencia se relaciona de cerca con el de compresión, porque se utiliza con los mismos tipos de polímero (termofijos y elastómeros). También se observan similitudes con el moldeo por inyección, en la forma en que la carga se precalienta en una cámara separada y después se inyecta en el molde. El moldeo por transferencia es capaz de moldear formas de pieza que son más intrincadas que en el moldeo por compresión, pero no tan complejas como con el moldeo por inyección. El moldeo por transferencia también llega a moldear con inserciones, para lo que se coloca un inserto de metal o cerámica dentro de la cavidad, antes de la inyección, y el plástico calentado se adhiere a aquél durante el moldeo.

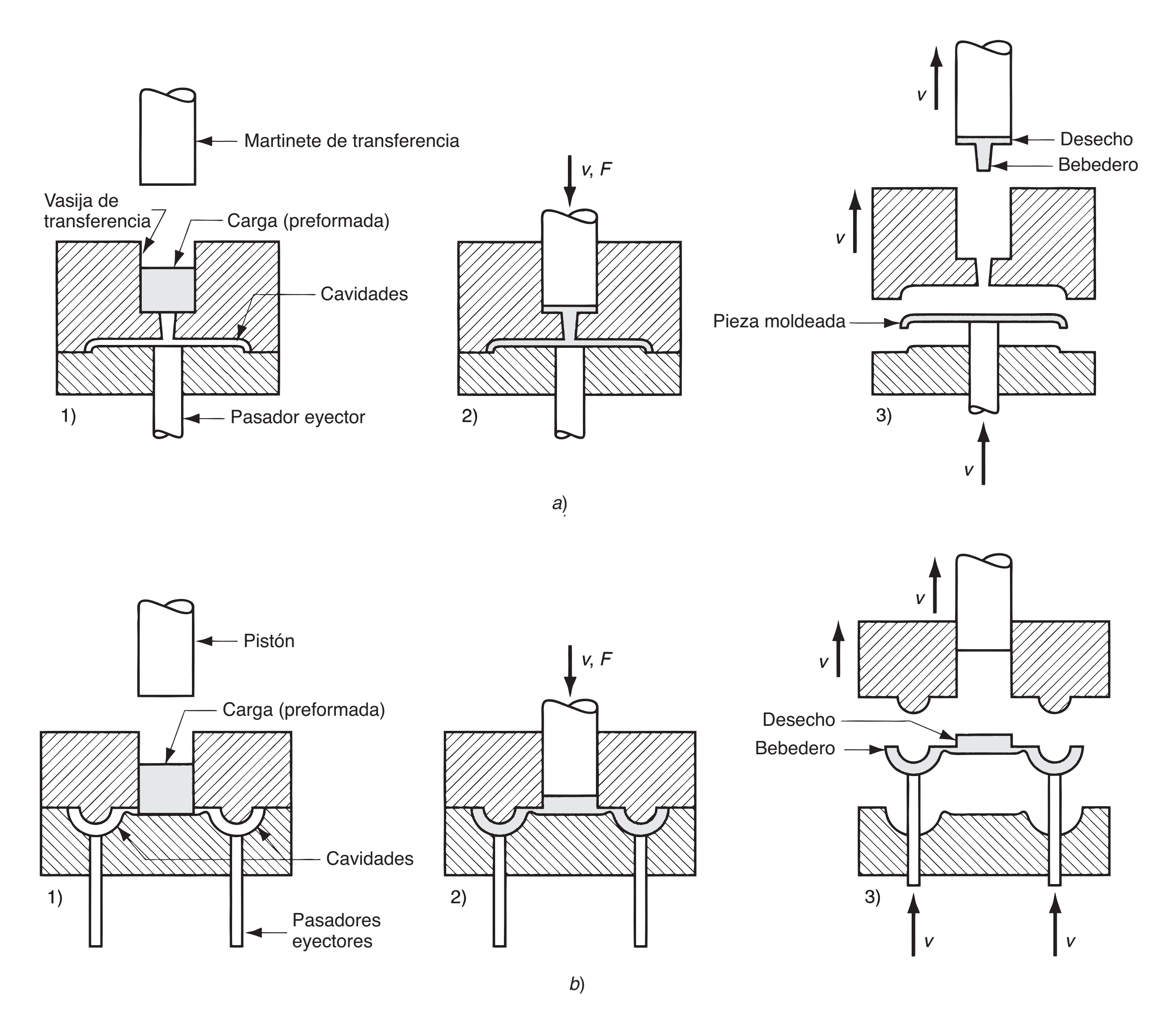


FIGURA 13.29 *a*) Moldeo por transferencia de vasija y *b*) moldeo por transferencia de pistón. El ciclo en ambos procesos es el siguiente: 1) se introduce la carga a la vasija, 2) el polímero suavizado se prensa y cura en la cavidad del molde y 3) se expulsa la pieza.

13.8 MOLDEO POR SOPLADO Y MOLDEO ROTACIONAL

Estos dos procesos se emplean para fabricar piezas huecas y sin costura de polímeros termoplásticos. El moldeo rotacional también se utiliza para termofijos. El tamaño de las piezas varía desde botellas de plástico pequeñas de sólo 5 ml (0.15 oz) a tambos de almacenamiento grandes, de 38 000 litros (10 000 gal) de capacidad. Aunque en ciertos casos los dos procesos compiten, por lo general tienen sus nichos propios. El moldeo por soplado es más apropiado para la producción en masa de contenedores desechables pequeños, en tanto que el rotacional es propio para formas más grandes y huecas.

13.8.1 Moldeo por soplado

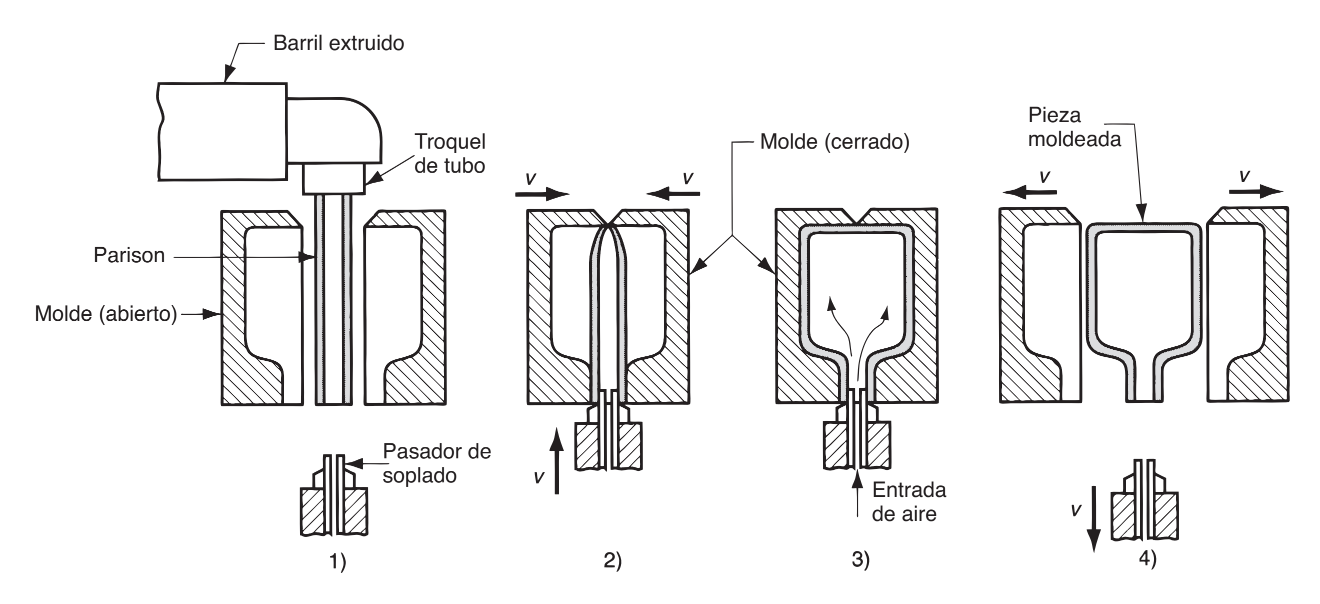
El ***moldeo por soplado*** es un proceso en el que se utiliza presión del aire para inflar plástico suave dentro de la cavidad de un molde. Es un proceso industrial importante para fabricar piezas de plástico huecas, de una sola pieza y con paredes delgadas, como botellas y contenedores similares. Debido a que muchos de esos artículos se utilizan para bebidas para el consumidor destinadas a mercados masivos, su producción está organizada para cantidades muy grandes. La tecnología proviene de la industria del vidrio (sección 12.2.1), con la que los plásticos compiten en el mercado de las botellas desechables y reciclables.

El moldeo por soplado se lleva a cabo en dos etapas: 1) fabricación de un tubo de inicio de plástico fundido, llamado ***parison*** (igual que en el soplado del vidrio), y 2) inflación del tubo hasta que adquiere la forma final que se desea. El formado del parison se lleva a cabo por cualquiera de dos procesos: 1) extrusión o 2) moldeo por inyección.

Moldeo por soplado y extrusión Esta forma de moldear consiste en el ciclo que se ilustra en la figura 13.30. En la mayoría de casos el proceso se organiza como operación de producción elevada para fabricar botellas de plástico. La secuencia es automática y, por lo general, se integra con operaciones posteriores tales como el llenado y etiquetado de las botellas.

Por lo general, se requiere que el contenedor soplado sea rígido, y la rigidez depende del espesor de la pared, entre otros factores. El espesor de la pared del contenedor soplado se relaciona con el parison de extruido inicial [12], lo que supone una forma cilíndrica del producto final. El efecto de la expansión del troquel sobre el parison se presenta en la figura 13.31. El diámetro medio del tubo conforme sale del troquel se determina con la media del diámetro del troquel D_d. La expansión del troquel ocasiona la expansión hasta un diámetro medio del parison D_p. Al mismo tiempo, el espesor

FIGURA 13.30 Moldeo soplado por extrusión: 1) extrusión de parison; 2) se pincha la parte superior del parison y se sella en la inferior alrededor de un pasador metálico de soplado, conforme las dos mitades del molde se juntan; 3) el tubo se infla de modo que adopta la forma de la cavidad del molde; y 4) el molde se abre para retirar la pieza solidificada.



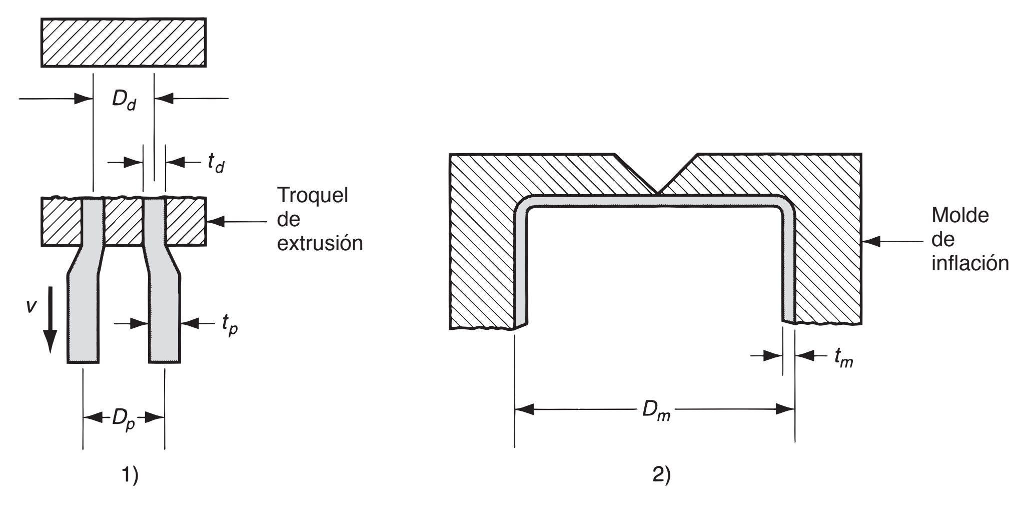


FIGURA 13.31 1) Dimensiones del troquel de extrusión, mostrando el parison después de la expansión del troquel, y 2) contenedor moldeado por soplado, en el moldeo soplado por extrusión.

de la pared se expande de t_d a t_p. La razón de expansión del diámetro del parison está dada por

$$r_{sd} = \frac{D_p}{D_d} \tag{13.20}$$

mientras que la razón de expansión del espesor de pared es

$$r_{st} = \frac{t_p}{t_d} \tag{13.21}$$

La expansión del espesor de pared es proporcional al cuadrado del diámetro de la expansión; es decir,

$$r_{st} = r_{sd}^2 \tag{13.22}$$

y por tanto,

$$t_p = r_{sd}^2 t_d \tag{13.23}$$

Cuando el parison se infla hasta el diámetro del molde de inflación D_m, con la reducción correspondiente del espesor de pared a t_m, y si se supone un volumen constante de la sección transversal, se tiene

$$\pi D_p t_p = \pi D_m t_m \tag{13.24}$$

Al resolver t_m se obtiene

$$t_m = \frac{D_p t_p}{D_m}$$

Se sustituyen las ecuaciones (13.20) y (13.23) en esta ecuación y queda

$$t_m = \frac{r_{sd}^3 t_d D_d}{D_m} \tag{13.25}$$

La cantidad de expansión del troquel en el proceso inicial de extrusión se mide por observación directa; y las dimensiones del troquel son conocidas. Así, es posible determinar el espesor de pared del contenedor moldeado por soplado.

Dado el espesor de pared del contenedor moldeado, se puede obtener una expresión para la presión de aire máxima que evita que el parison se queme durante el inflado [12].

Una ecuación que proviene de la resistencia de materiales relaciona el esfuerzo con la presión interna p en un tubo, dado su diámetro D y espesor de pared t:

$$\sigma = \frac{pD}{2t} \tag{13.26}$$

Con el razonamiento de que el esfuerzo máximo ocurrirá justo antes de que el parison se expanda al tamaño del diámetro del molde soplado (esto es, cuando D sea máximo y t mínimo), y al reacomodar la ecuación (13.26) para resolver p, se obtiene

$$p = \frac{2\sigma t_m}{D_m} \tag{13.27}$$

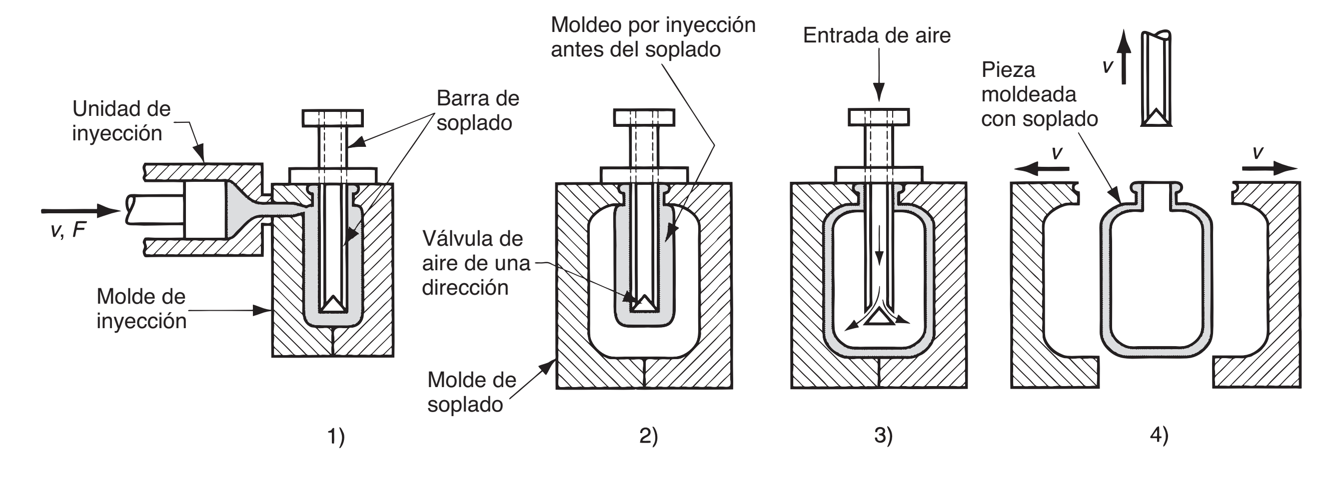
donde p es la presión del aire usada durante el moldeo soplado, en Pa (lb/in^2); σ = esfuerzo de la tensión máxima permisible en el polímero durante la inflación, Pa (lb/in^2); y t_m y D_m son el espesor y diámetro de pared, respectivamente, del molde, m (in). La dificultad para utilizar la fórmula es la determinación del esfuerzo permisible porque el polímero se encuentra en una condición de calentamiento y muy plástica. En una operación industrial, los parámetros del proceso se estiman por ensayo y error.

Moldeo soplado por inyección En este proceso, el parison de inicio se moldea por inyección en vez de extrusión. En la figura 13.32 se presenta una secuencia simplificada. En comparación con su proceso competidor basado en la extrusión, el de soplado por inyección tiene una tasa de producción menor, lo que explica por qué se usa menos.

En una variante del moldeo con soplado por inyección, llamada ***moldeo soplado por estiramiento*** (figura 13.33), la barra de soplado se extiende hacia abajo dentro del parison moldeado por inyección durante la etapa 2, lo que estira el plástico suave y crea un esfuerzo más favorable del polímero que el moldeo por inyección convencional o soplado por extrusión. La estructura resultante es más rígida, con más transparencia y resistencia mayor al impacto. El material más utilizado para el moldeo soplado por estiramiento es el tereftalato de polietileno (PET), un poliéster que tiene permeabilidad muy baja y adquiere resistencia por medio del proceso de moldeo soplado por estiramiento. La combinación de propiedades lo hace ideal como contenedor de bebidas carbonatadas.

Materiales y productos El moldeo soplado se limita a los termoplásticos. El polietileno es el polímero de uso más común para este proceso, en particular, el de alta densidad y peso molecular elevado (HDPE y HMWPE). Si se comparan sus propiedades con las del PE de

FIGURA 13.32 Moldeo soplado por inyección: 1) se inyecta al parison moldeado alrededor de una barra de soplado, 2) se abre el molde de inyección y el parison se transfiere a un molde de soplado, 3) se infla el polímero suave para conformarlo al molde de soplado y 4) se abre el molde de soplado, y se retira el producto.



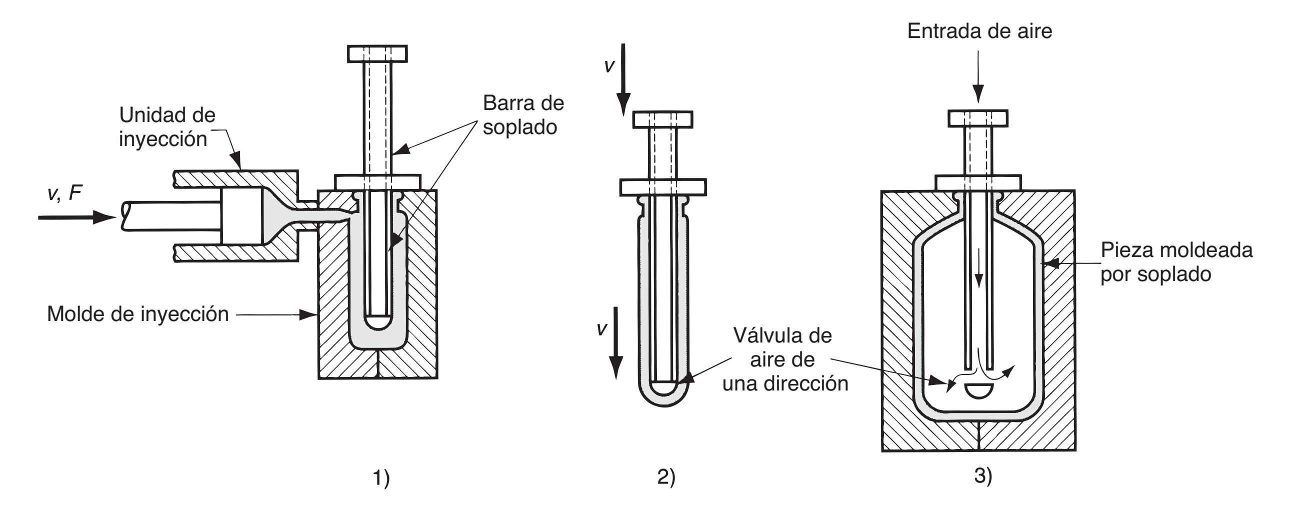


FIGURA 13.33 Moldeo soplado por estiramiento: 1) moldeo con inyección del parison, 2) estiramiento y 3) soplado.

baja densidad dados los requerimientos de rigidez del producto final, es más económico usar estos materiales más caros debido a que las paredes del contenedor pueden fabricarse más delgadas. Otras molduras por soplado están hechas de polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC) y tereftalato de polietileno.

Los contenedores desechables para empacar bienes de consumo líquidos constituyen la mayor parte de productos que se fabrican con moldeo por soplado, pero no son los únicos. Otros incluyen tambos grandes (55 gal) para embarcar líquidos y polvos, grandes tanques de almacenamiento (2 000 gal), tanques para gasolina de automóviles, juguetes y cascos para veleros y botes pequeños. En el último caso, se fabrican dos cascos en un moldeo único por soplado y se cortan posteriormente para formar dos cascos abiertos.

13.8.2 Moldeo rotacional

El moldeo rotacional utiliza la gravedad en lugar de un molde rotatorio, a fin de lograr una forma hueca. El también llamado ***rotomoldeo*** es una alternativa al moldeo por soplado a fin de fabricar formas grandes y huecas. Se emplea principalmente para polímeros termoplásticos, pero cada vez son más comunes las aplicaciones para termofijos y elastómeros. El rotomoldeo tiende a favorecer configuraciones geométricas externas más complejas, piezas más grandes y cantidades de producción pequeñas, más que el moldeo por soplado. El proceso consiste en las siguientes etapas: 1) se carga una cantidad predeterminada de polvo de polímero en la cavidad de un molde deslizante. 2) Después se calienta el molde y se gira en forma simultánea sobre dos ejes perpendiculares, de modo que el polvo impregna todas las superficies interiores del molde, y forma gradualmente una capa fundida de espesor uniforme. 3) Mientras aún gira, el molde se enfría de modo que la capa exterior de plástico se solidifica. 4) Se abre el molde y se descarga la pieza. Las velocidades rotacionales que se emplean en el proceso son relativamente bajas. Es la gravedad, no la fuerza centrífuga, la que genera el recubrimiento uniforme de las superficies del molde.

En el moldeo rotacional, los moldes son simples y baratos, en comparación con el moldeo por inyección o por soplado, pero el ciclo de producción es mucho más largo, y dura 10 minutos o más. Para balancear estas ventajas y desventajas en la producción, es frecuente que el moldeo rotacional se lleve a cabo en una máquina de cavidades múltiples, como la de tres estaciones que se ilustra en la figura 13.34. La máquina está diseñada para indizar tres moldes en secuencia a través de las tres estaciones de trabajo. Así, se trabaja con los tres moldes en forma simultánea. La primera estación de trabajo es de carga y descarga, en la que la pieza terminada se retira del molde; y se carga el polvo en la cavidad, para la

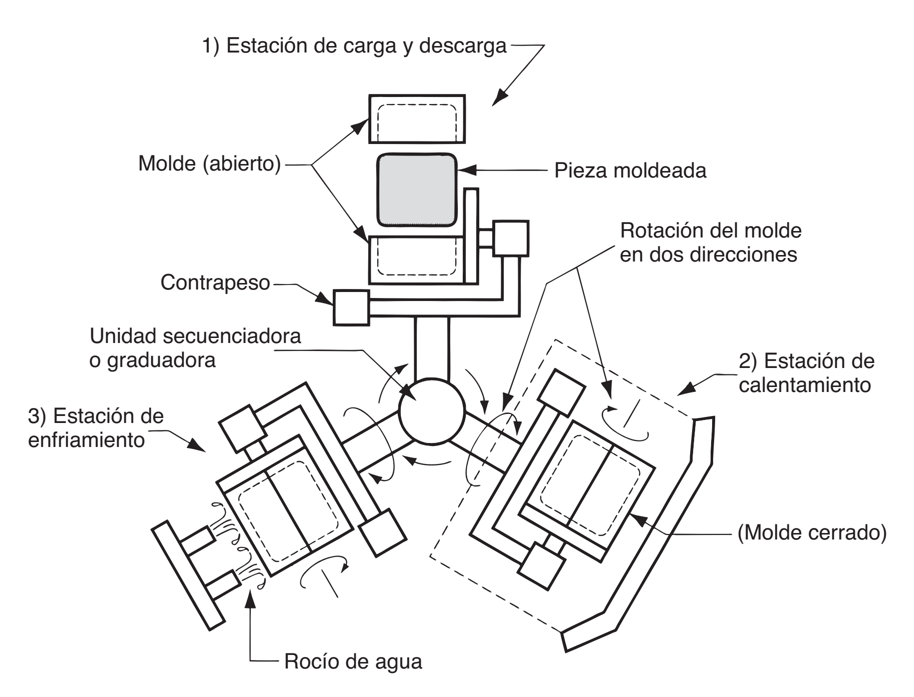


FIGURA 13.34 Ciclo de moldeo rotacional ejecutado sobre una máquina indizadora de tres estaciones: 1) estación de carga y descarga; 2) el molde se calienta y gira; 3) enfriamiento del molde.

pieza siguiente. La segunda estación consiste en una cámara de calentamiento en la que aire a temperatura alta calienta el molde por convección al mismo tiempo que éste gira. Las temperaturas dentro de la cámara son de alrededor de 375 ºC (700 ºF), lo que depende del polímero y el artículo que se moldea. La tercera estación enfría el molde, con el uso de aire frío forzado o rocío de agua, para enfriar y solidificar el plástico interior del molde.

Con moldeo rotacional se elabora una variedad fascinante de artículos. La lista incluye juguetes huecos tales como caballitos y pelotas; cascos de lanchas y canoas, cajas de arena, alberquitas; boyas y otros dispositivos de flotación; elementos de cajas de tráiler, tableros automotrices, tanques de combustible; piezas de equipaje, mobiliario, botes para basura; maniquíes; barriles industriales de gran tamaño, contenedores y tanques de almacenamiento; excusados portátiles, y tanques sépticos. El material más utilizado para moldear es el polietileno, en especial el HDPE. Otros plásticos incluyen el polipropileno, ABS y poliestireno de alto impacto.

13.9 TERMOFORMADO

El ***termoformado*** es un proceso en el que se calienta y deforma una hoja plana termoplástica para hacer que adquiera la forma deseada. El proceso se utiliza mucho para empacar productos de consumo y para fabricar artículos grandes como tinas de baño, reflectores de contorno y forros interiores de puertas para refrigeradores.

El termoformado consiste en dos etapas principales: 1) calentamiento y 2) formado. Por lo general, el calentamiento se realiza con el empleo de calentadores eléctricos radiantes, localizados a ambos lados de la hoja de plástico inicial, a una distancia aproximada de 125 mm (5 in). La duración del ciclo de calentamiento necesario para suavizar lo suficiente la hoja depende del polímero, de su espesor y color. Los métodos por los que se lleva a cabo la etapa de formado se clasifican en tres categorías básicas: 1) termoformado al vacío, 2) termoformado de presión y 3) termoformado mecánico. En el estudio de dichos métodos se describió el formado de materiales en forma de hoja; en la industria del empaque, la mayor parte de operaciones de termoformado se ejecutan sobre películas delgadas.

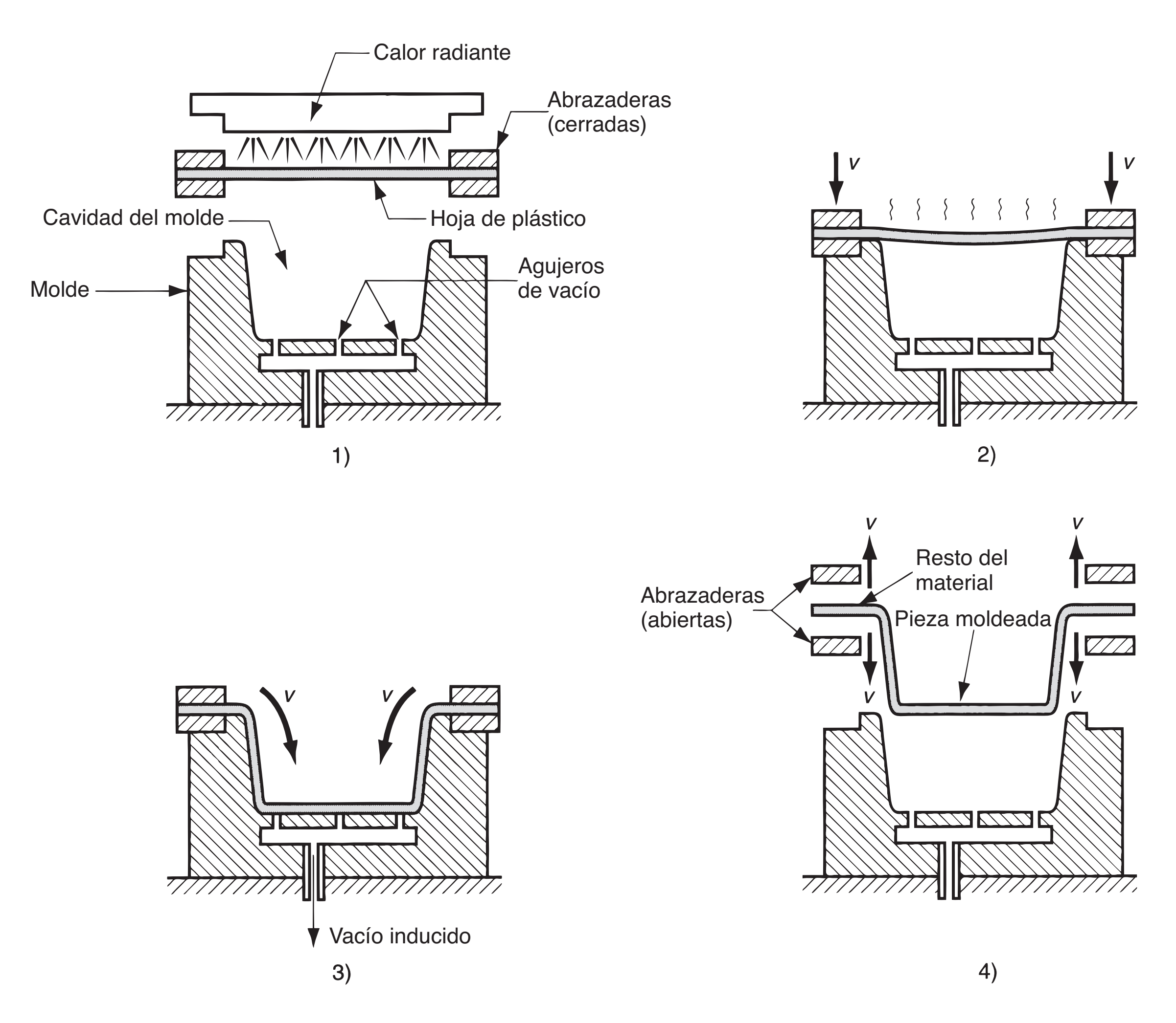


FIGURA 13.35 Termoformado al vacío: 1) una hoja de plástico se suaviza con calentamiento; 2) la hoja suavizada se coloca sobre una cavidad de molde cóncava; 3) un vacío empuja la hoja hacia la cavidad; y 4) el plástico se endurece al contacto con la superficie fría del molde, y posteriormente la pieza se elimina y recorta del resto del material.

Termoformado al vacío El primer método fue el ***termoformado al vacío*** (llamado tan sólo ***formado al vacío***, cuando se creó en la década de 1950) en el que se utiliza una presión negativa para empujar una hoja precalentada contra la cavidad de un molde. El proceso se explica en la figura 13.35, en su forma más básica. Los agujeros para inducir el vacío en el molde son del orden de 0.8 mm (0.031 in) de diámetro, por lo que su efecto sobre la superficie del plástico es menor.

Termoformado de presión Una alternativa para formar al vacío involucra a una presión positiva que fuerza al plástico calentado hacia la cavidad del molde. Ésta se llama ***termoformado de presión***, o ***formado por soplado***; su ventaja sobre el formado al vacío es que es posible generar presiones más grandes, ya que esta última se limita a un máximo teórico de 1 atm. En el formado por soplado son comunes las presiones de 3 a 4 atm. La secuencia del proceso es similar a la anterior; la diferencia estriba en que la hoja se presuriza desde arriba de la cavidad del molde. En el molde hay agujeros de conducción para expulsar el aire atrapado. En la figura 13.36 se ilustra la porción formadora de la secuencia (etapas 2 y 3).

En este punto, es útil distinguir entre los moldes positivo y negativo. Los moldes que se muestran en las figuras 13.35 y 13.36 son ***moldes negativos*** debido a que tienen cavidades

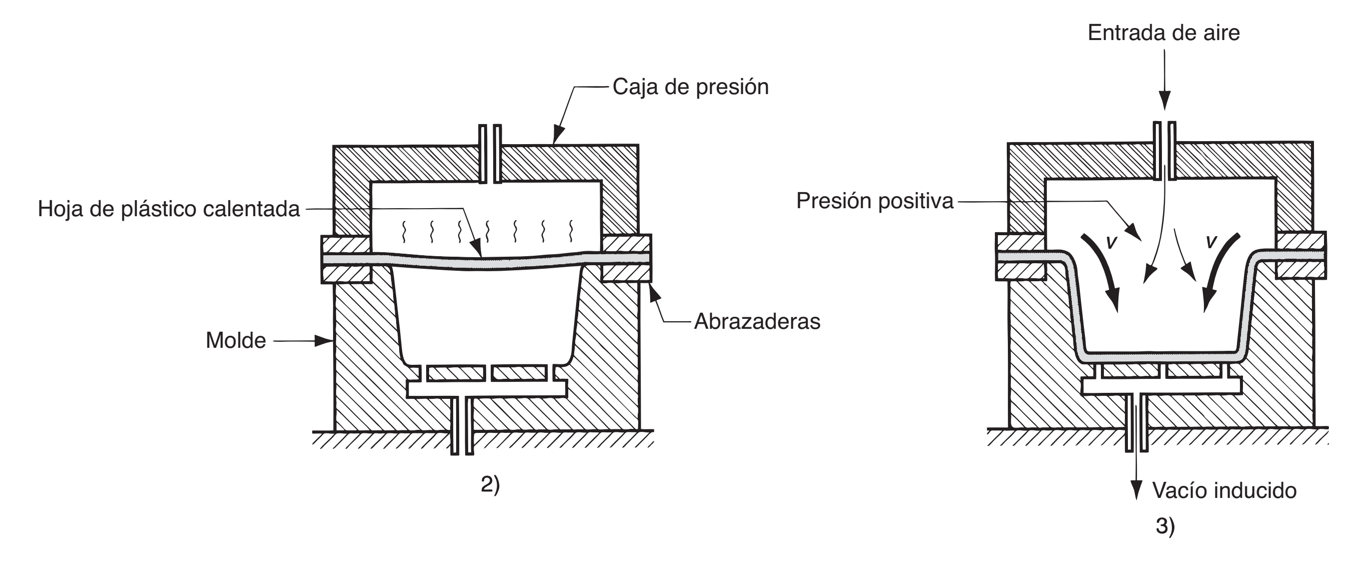


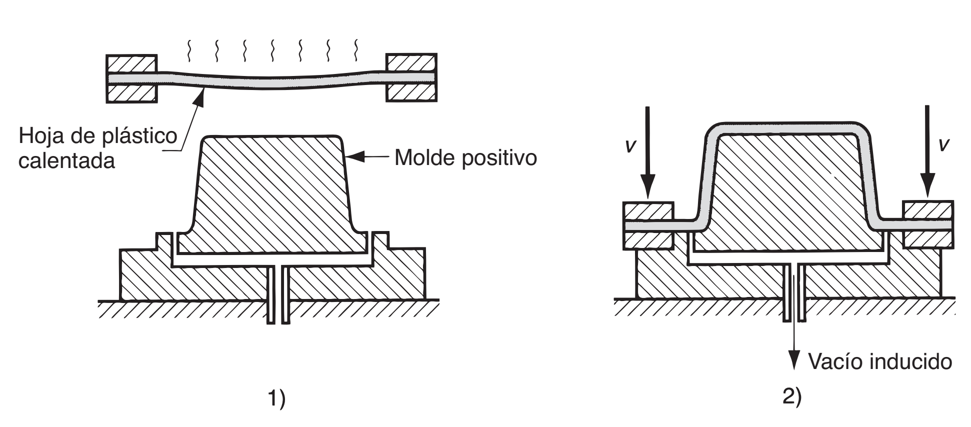
FIGURA 13.36 Termoformado a presión. La secuencia es similar a la de la figura anterior; la diferencia está en que: 2) la hoja se coloca sobre la cavidad de un molde y 3) una presión positiva fuerza la hoja hacia la cavidad.

cóncavas. Un ***molde positivo*** tiene forma convexa. En el termoformado se utilizan ambos tipos. En el caso del molde positivo, la hoja calentada se oprime sobre la forma convexa y se utiliza presión negativa o positiva para forzar al plástico contra la superficie del molde. En la figura 13.37 se muestra el molde positivo para el caso de formado al vacío.

Podría parecer que la diferencia entre los moldes positivo y negativo carece de importancia, porque las formas de la pieza son idénticas, como se aprecia en los diagramas. Sin embargo, si la pieza se presiona contra un molde negativo, entonces su superficie exterior tendrá el mismo aspecto que la de la cavidad del molde. La superficie interior será una aproximación del contorno y poseerá un acabado correspondiente al de la hoja de inicio. Por el contrario, si la hoja se presiona sobre un molde positivo, entonces su superficie interior será igual a la del molde convexo y su superficie exterior seguirá aproximadamente igual. En función de los requerimientos del producto, esta diferencia puede ser importante.

Otra diferencia está en el adelgazamiento de la hoja de plástico, que es uno de los problemas del termoformado. A menos que el contorno del molde sea muy somero, habrá un adelgazamiento significativo de la hoja según se estire para conformarse al contorno del molde. Los moldes positivo y negativo producen patrones de adelgazamiento diferentes en una pieza dada. Considere el lector la pieza en forma de tina que se da como ejemplo. En el molde positivo, conforme la hoja se presiona sobre la forma convexa, la porción en

FIGURA 13.37 Uso de un molde positivo en el termoformado al vacío: 1) la hoja de plástico calentada se coloca sobre el molde convexo y 2) la abrazadera baja hacia esa posición y presiona la hoja sobre el molde conforme el vacío la fuerza contra la superficie de este.



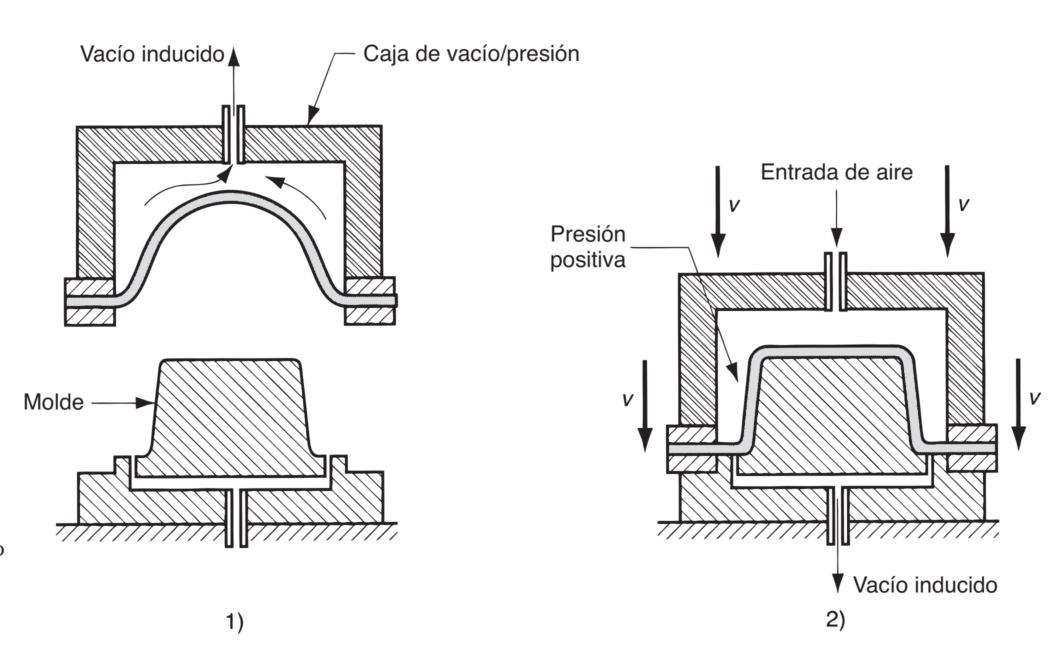


FIGURA 13.38 Preestirado de la hoja en 1) antes de plegarla y vaciarla sobre un molde positivo en 2).

contacto con la superficie superior (que corresponde a la base de la tina) se solidifica con rapidez y no experimenta virtualmente ningún estiramiento. Esto da como resultado una base gruesa pero un adelgazamiento significativo de las paredes de la tina. Por el contrario, un molde negativo genera una distribución más pareja del estiramiento y adelgazamiento de la hoja antes de que haga contacto con la superficie fría.

Una forma de mejorar la distribución del adelgazamiento con un molde positivo es preestirar la hoja antes de plegarla sobre la forma convexa. Como se ve en la figura 13.38, la hoja de plástico calentada se estira de modo uniforme por la presión del vacío hacia una forma esférica antes de empujarla sobre el molde.

La primera etapa que se ilustra en el recuadro 1) de la figura 13.38 puede utilizarse por sí sola como un método para producir piezas en forma de globo, tales como tragaluces y domos transparentes. En el proceso se aplica aire a presión muy controlada para inflar la hoja suave. La presión se mantiene hasta que la forma soplada se ha solidificado.

Termoformado mecánico El tercer método, llamado ***termoformado mecánico***, utiliza moldes positivos y negativos que se juntan contra la hoja de plástico calentada, lo que la fuerza a adoptar la forma de ellos. En el método de formado mecánico puro no se utiliza en absoluto la presión del aire (positiva o negativa). En la figura 13.39 se ilustra el proceso. Sus ventajas son que se tiene un control dimensional mejor y la oportunidad de detallar la superficie de la pieza por ambas caras. La desventaja es que se requieren dos mitades de molde; por esa razón, los moldes para los otros dos métodos son menos costosos.

Aplicaciones El termoformado es un proceso de conformación secundario; el proceso primario es que produce la hoja o película (sección 13.3). Sólo los termoplásticos pueden termoformarse, ya que las hojas extruidas de polímeros termofijos o elastoméricos ya tienen entrecruzamiento y no es posible suavizarlas volviéndolas a calentar. Los plásticos comunes para el termoformado son el poliestireno, acetato de celulosa y butirato acetato de celulosa, ABS, PVC, acrílico (polimetilacrilato), polietileno y polipropileno.

En la industria del empaque se llevan a cabo operaciones de termoformado para producción en masa. La hoja o película inicial se alimenta con rapidez a través de la cámara de calentamiento y luego se le da mecánicamente la forma que se desea. Es frecuente que las operaciones se diseñen para producir piezas múltiples a cada paso de la prensa con el empleo de moldes con muchas hormas y cavidades. En ciertos casos, la máquina de

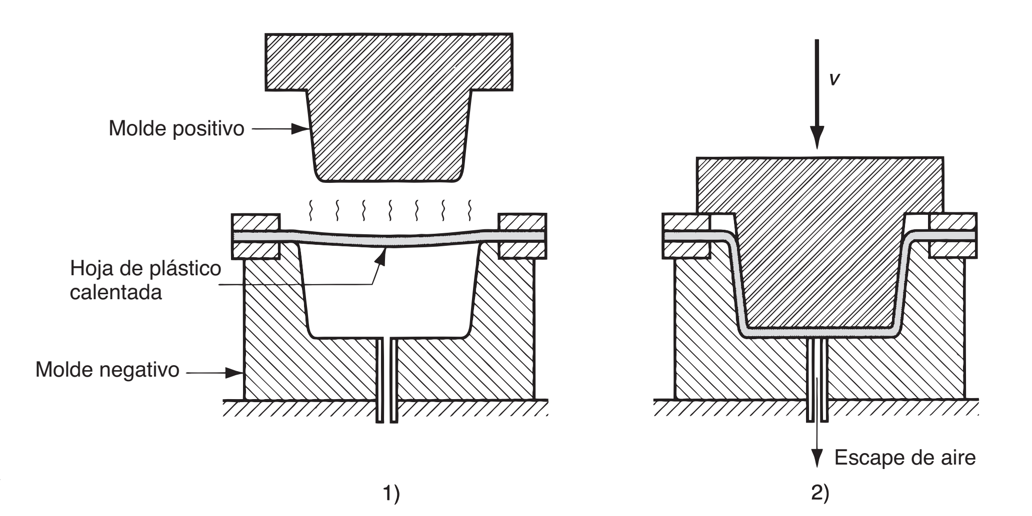


FIGURA 13.39 Termoformado mecánico: 1) hoja calentada sobre un molde negativo y 2) molde cerrado para dar forma a la hoja.

extrusión que produce la hoja o película se localiza inmediatamente antes del proceso de termoformado, con lo que se elimina la necesidad de recalentar el plástico. Y para tener una eficiencia mayor, el proceso de llenado que coloca el artículo alimenticio consumible dentro del contenedor se sitúa de inmediato después del termoformado.

Los artículos de película delgada para empaque que se producen en masa con termoformado incluyen paquetes de ampolletas y envolturas. Ofrecen una manera atractiva de presentar ciertos productos de consumo tales como cosméticos, artículos para baño, herramientas pequeñas y sujetadores (grapas, tornillos, etc). Las aplicaciones del termoformado incluyen piezas grandes que pueden producirse a partir de hojas más gruesas. Algunos ejemplos incluyen cubiertas para máquinas de oficina, cascos de lancha, regaderas, difusores de luz, anuncios de publicidad y señalamientos, tinas para baño y ciertos juguetes. Ya se mencionaron tragaluces y forros interiores de las puertas de los refrigeradores. Éstos se harían, respectivamente, de acrílico (por su transparencia) y ABS (debido a la facilidad de formarlo y su resistencia a los aceites y grasas que hay en los refrigeradores).

13.10 FUNDICIÓN

En la conformación de polímeros, la ***fundición*** involucra verter una resina líquida a un molde, con el uso de la gravedad para llenar la cavidad, y dejar que el polímero se endurezca. Tanto los termoplásticos como los termofijos se funden. Algunos ejemplos de los primeros incluyen los acrílicos, poliestireno, poliamidas (nylon) y vinilos (PVC). La conversión de la resina líquida en un termoplástico endurecido se lleva a cabo de varias maneras, que incluyen 1) calentar la resina termoplástica a un estado muy fluido de modo que se vierta y llene la cavidad del molde con facilidad, y después se le deja enfriar y solidificar en el molde; 2) usar un prepolímero (o monómero) de peso molecular bajo y polimerizarlo en el molde para que forme un termoplástico de peso molecular elevado; y 3) verter un plastisol (suspensión líquida de partículas finas de una resina termoplástica como el PVC, en un plastificador) en un molde calentado para que forme un gel y se solidifique.

Los polímeros termofijos a los que se da forma por medio de fundición incluyen el poliuretano, poliésteres insaturados, fenoles y epóxicos. El proceso involucra verter los ingredientes del líquido que forman el termofijo en un molde para que ocurra la polimerización y el entrecruzamiento. Quizá se requiera calor y/o un catalizador en función del sistema de resina. Las reacciones deben ser suficientemente lentas para permitir que el molde se vierta por completo. Los sistemas termofijos que reaccionan rápido, tales como los de ciertos poliuretanos, requieren procesos de conformación alternativos como el moldeo por inyección de reacción (sección 13.6.6).

Las ventajas de la fundición sobre procesos alternativos como el moldeo por inyección incluyen las siguientes: 1) el molde es más sencillo y menos costoso, 2) el artículo fundido está relativamente libre de esfuerzos residuales y memoria viscoelástica y 3) el proceso es apropiado para cantidades pequeñas de producción. Al centrarnos en la segunda ventaja, las hojas de acrílico (plexiglás, Lucite), por lo general, se funden entre dos placas de vidrio muy pulidas. El proceso de fundición permite un grado alto de aplanamiento y que se logren las cualidades ópticas que son deseables en las hojas de plástico transparente. Dicho aplanamiento y transparencia no pueden obtenerse con la extrusión de hojas planas. Una desventaja de ciertas aplicaciones es la contracción significativa de la pieza fundida durante la solidificación. Por ejemplo, las hojas de acrílico pasan por una contracción volumétrica de alrededor de 20% cuando se funden. Esto es mucho más que en el moldeo por inyección, en el que se emplean presiones elevadas para comprimir la cavidad del molde a fin de reducir la contracción.

La fundición en hueco es una alternativa a la fundición convencional; se deriva de la tecnología de fundición de metal. En la ***fundición en hueco***, se vierte un plastisol líquido en la cavidad de un molde de deslizamiento caliente, por lo que se forma una capa en la superficie del molde. Después de una duración que depende del espesor que se desea tenga la capa, se extrae el exceso de líquido del molde; luego se abre este para retirar la pieza. El proceso también se denomina ***fundición con concha*** [6].

Una aplicación de la fundición que tiene importancia en la electrónica es el ***encapsulamiento***, en el que artículos tales como transformadores, bobinas, conectores y otros componentes eléctricos se encierran en plástico por medio de la fundición.

13.11 PROCESAMIENTO Y FORMADO DE ESPUMA DE POLÍMERO

Una ***espuma de polímero*** es una mezcla de polímero y gas, lo que da al material una estructura porosa o celular. Otros términos que se emplean para las espumas de polímero incluyen ***polímero celular, polímero soplado*** y ***polímero expandido***. Las espumas de polímero más comunes son el poliestireno (Styrofoam, marca registrada) y poliuretano. Otros polímeros que se utilizan para fabricar espumas incluyen cauchos naturales ("caucho espumado") y cloruro de polivinilo (PVC).

Las propiedades características de un polímero espumado incluyen: 1) baja densidad, 2) alta resistencia por unidad de peso, 3) buen aislamiento térmico y 4) buenas cualidades de absorción de energía. La elasticidad del polímero base determina la propiedad correspondiente de la espuma. Las espumas de polímero se clasifican [6] como 1) ***elastoméricas***, en las que la matriz de polímero es un caucho, capaz de una gran deformación elástica; 2) ***flexible***, en el que la matriz es un polímero muy plástico tal como el PVC suave y 3) ***rígido***, en el que el polímero es un termoplástico rígido tal como el poliestireno o un plástico termofijo como un fenólico. En función de la formulación química y grado de entrecruzamiento, el poliuretano varía entre las tres categorías.

Las propiedades características de las espumas de polímero, así como la capacidad para controlar su comportamiento elástico a través de la selección del polímero base, hacen a estos materiales muy apropiados para ciertos tipos de aplicaciones, incluso tazas para bebidas calientes, materiales estructurales para aislamiento de calor y núcleos de paneles estructurales, materiales de empaque, materiales acojinados para muebles y almohadas, acojinamiento de tableros de automóvil y productos que requieren flotación.

13.11.1 Procesos de espumado

Los gases comunes que se usan en las espumas de polímero son aire, nitrógeno y dióxido de carbono. La proporción del gas varía hasta 90% o más. Éste se introduce en el polímero con varios métodos, llamados procesos de espumado. Éstos incluyen: 1) mezclar una resina

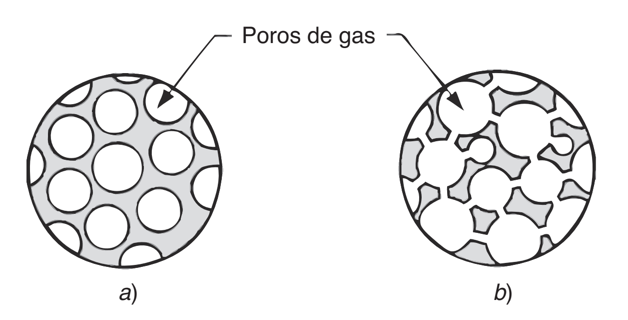


FIGURA 13.40 Dos estructuras de espuma de polímero: *a*) celda cerrada y *b*) celda abierta.

líquida con aire por ***agitación mecánica***, después se endurece el polímero por medio de calor o reacción química; 2) mezclar un ***agente de soplado físico*** con el polímero, un gas como el nitrógeno (N_2) o el pentano (C_5H_{12}), que se disuelve en el polímero fundido sujeto a presión, de modo que el gas sale de la solución y se expande cuando después se reduce la presión; y 3) se mezcla el polímero con componentes químicos, llamados ***agentes de soplado químicos*** que se descomponen a temperaturas altas y liberan gases tales como el CO_2 o el N_2 dentro de la mezcla.

La forma en que se distribuye el gas a través de la matriz de polímero permite distinguir dos estructuras de espuma básicas, que se ilustran en la figura 13.40: *a*) ***celda cerrada***, en la que los poros del gas son aproximadamente esféricos y están separados por completo unos de otros por la matriz de polímero, y *b*) ***celda abierta***, en la que los poros están interconectados hasta cierto punto, lo que permite el paso de un fluido a través de la espuma. Una estructura de celda cerrada constituye un chaleco salvavidas satisfactorio; una de celda abierta se llenaría de agua. Otros atributos que caracterizan la estructura incluyen las proporciones relativas del polímero y el gas (ya mencionadas) y la densidad de celdas (número de celdas por unidad de volumen), que es inversamente proporcional al tamaño de las celdas de aire individuales en la espuma.

13.11.2 Procesos de conformado

Hay muchos procesos para dar forma a los productos de espuma de polímero. Como las dos espumas más importantes son el poliestireno y el poliuretano, el presente análisis se limita a los procesos de conformación de estos dos materiales. Debido a que el poliestireno es un termoplástico y el poliuretano puede ser un termofijo o bien un elastómero (también un termoplástico, pero es menos importante en esta forma), los procesos que se estudian aquí para dichos materiales son representativos de los que se emplean en otras espumas de polímero.

Espumas de poliestireno Las espumas de poliestireno reciben su forma por extrusión y moldeo. En la ***extrusión***, se alimenta un agente de soplado químico o físico dentro del polímero fundido, cerca del extremo del troquel del barril extruidor; así, el extruido consiste en el polímero expandido. De esta manera se fabrican hojas y tableros grandes, que después se cortan al tamaño para hacer paneles y secciones aislantes del calor.

Para la espuma de poliestireno existen varios procesos de moldeo. Ya se analizó el ***moldeo de espuma estructural*** y el ***moldeo por sándwich*** (sección 13.6.6). Un proceso que se emplea más es el ***moldeo de espuma expansible***, en el que el material que se moldea por lo general consiste en cuentas de poliestireno preespumadas. Éstas se producen a partir de pellets de poliestireno sólido que han sido impregnadas de un agente soplador físico. El preespumado se lleva a cabo en un tanque grande por medio de la aplicación de vapor caliente para expandir parcialmente los pellets, que en forma simultánea se agitan para impedir su fusión. Después, en el proceso de moldeo, las cuentas preespumadas se introducen a la cavidad del molde, donde se expanden aún más y se funden entre sí para

formar el producto moldeado. De este modo se producen tazas para bebidas calientes, hechas de espuma de poliestireno. En ciertos procesos, se omite la etapa de preespumado, y las cuentas impregnadas se introducen directamente a la cavidad del molde, donde se calientan, expanden y funden. En otras operaciones, la espuma expansible primero se conforma como hoja plana con el ***proceso de extrusión de película soplada*** (sección 13.3) y luego se le da forma con ***termoformado*** (sección 13.9) en contenedores para empaque, tales como cajas para huevos.

Espumas de poliuretano Los productos de espuma de poliuretano están hechos en un proceso de una etapa en el que dos ingredientes líquidos (poliol e isocianato) se mezclan e introducen de inmediato a un molde u otra forma, de modo que el polímero se sintetiza y al mismo tiempo se crea la forma de la pieza. Los procesos de conformación de la espuma de poliuretano se dividen en dos tipos básicos [11]: rocío y vertido. El ***rocío*** involucra el empleo de una pistola de rocío en el que los dos ingredientes se introducen de manera continua, se mezclan y luego se rocían sobre una superficie objetivo. Las reacciones que llevan a la polimerización y espumado ocurren después de la aplicación sobre la superficie. Este método se utiliza para aplicar espumas rígidas de aislamiento a paneles para la construcción, vagones y objetos grandes similares. El ***vertido*** involucra la aplicación de los ingredientes desde una cabeza mezcladora hacia un molde abierto o cerrado en el que tienen lugar las reacciones. Un molde abierto puede ser un contenedor con el contorno requerido (por ejemplo, para un asiento acojinado de automóvil) o un canal largo que se mueve con lentitud una vez pasado el embudo de vertido para fabricar secciones de espuma continuas y largas. El molde cerrado es una cavidad cerrada por completo en la que se introduce cierta cantidad de la mezcla. La expansión de los reactivos llena por completo la cavidad para formar la pieza. Para poliuretanos de reacción rápida, la mezcla debe inyectarse de prisa a la cavidad del molde con el empleo de ***moldeo por inyección de reacción*** (sección 13.6.6). El grado de entrecruzamiento, controlado por los ingredientes de arranque determina la rigidez relativa de la espuma resultante.

13.12 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

Los plásticos son un material importante de diseño, pero el diseñador debe estar alerta a sus limitaciones. En esta sección se enlistan algunos lineamientos de diseño para componentes de plástico, se comienza con las que se aplican en general y siguen las aplicables a la extrusión y moldeo (moldeo por inyección, por compresión y transferencia).

13.12.1 Consideraciones generales

Estos lineamientos generales se aplican sin importar el proceso de formado. Sobre todo son limitaciones de los materiales plásticos que el diseñador debe tomar en consideración.

- ***Resistencia y rigidez:*** Los plásticos no son tan fuertes o rígidos como los metales. No deben usarse en aplicaciones en las que se vayan a encontrar esfuerzos grandes. La resistencia al escurrimiento plástico también es una limitante. Las propiedades de resistencia varían en forma significativa entre los plásticos, y en ciertas aplicaciones las razones resistencia a peso de algunos de ellos son competitivas con las de los metales.
- ***Resistencia al impacto:*** La capacidad que tienen los plásticos de absorber impactos por lo general es buena; se comparan de modo favorable con la mayoría de metales.
- ***Temperaturas de servicio:*** Con respecto de las de los metales y cerámicos, las de los plásticos son limitadas.
- ***Expansión térmica:*** Es mayor para los plásticos que para los metales, por lo que los cambios dimensionales debidos a las variaciones de temperatura son mucho más significativos que para los metales.
- Muchos tipos de plásticos están sujetos a ***degradación*** por la luz solar y otras formas de radiación. Asimismo, algunos se degradan en atmósferas de oxígeno y ozono. Por

último, los plásticos son solubles en muchos solventes comunes. Por el lado positivo, son resistentes a los mecanismos convencionales de corrosión que afectan a muchos metales. La debilidad de plásticos específicos debe ser tomada en cuenta por el diseñador.

13.12.2 Plásticos extruidos

La extrusión es uno de los procesos de conformado de plásticos que se utiliza más. A continuación se presentan varias recomendaciones de diseño para el proceso convencional (recopiladas sobre todo de la referencia [3]).

➢ ***Espesor de pared:*** En la sección transversal extruida es deseable un espesor uniforme de la pared. Las variaciones de éste darán como resultado un flujo no uniforme del plástico y enfriamiento irregular que tenderá a pandear el extruido.
➢ ***Secciones huecas:*** Éstas complican el diseño del troquel y el flujo del plástico. Es deseable utilizar secciones transversales extruidas que no sean huecas, pero que satisfagan los requerimientos funcionales.
➢ ***Esquinas:*** En la sección transversal deben evitarse las esquinas agudas, dentro y fuera, porque dan como resultado un flujo irregular durante el procesamiento, y concentraciones de esfuerzos en el producto final.

13.12.3 Piezas moldeadas

Hay muchos procesos para moldear plásticos. En este artículo se dan lineamientos que se aplican al moldeo por inyección (el proceso más popular para moldear), por compresión y transferencia (recopilados de Bralla [3], McCrum [10] y otras fuentes).

➢ ***Cantidades económicas de producción:*** Cada pieza moldeada requiere un molde único, el cual para cualquiera de estos procesos es costoso, en particular para el moldeo por inyección. Las cantidades mínimas de producción para este proceso son de alrededor de 10 000 piezas; para el moldeo por compresión, 1000 piezas es lo mínimo, debido a los diseños más sencillos del molde que se necesita. El moldeo por transferencia se ubica entre las dos cifras anteriores.
➢ ***Complejidad de la pieza:*** Si bien las configuraciones geométricas más complejas de la pieza significan moldes más costosos, puede ser económico diseñar un molde complejo si la alternativa involucra muchos componentes individuales que se ensamblen juntos. Una ventaja del moldeo de plástico es que permite características funcionales múltiples para combinarse en una pieza.
➢ ***Espesor de pared:*** Las secciones transversales gruesas por lo general son indeseables; con ellas se desperdicia material, es más probable que se causen pandeos por la contracción y les toma más tiempo endurecer.
➢ ***Costillas de refuerzo:*** Se emplean en las piezas de plástico moldeado para obtener mayor rigidez sin un espesor de pared excesivo. Las costillas deben ser más delgadas que las paredes que refuerzan, a fin de minimizar las marcas de hundimiento en la pared exterior.
➢ ***Radios de las esquinas y biseles:*** Las esquinas agudas, tanto externas como internas, son indeseables en las piezas moldeadas; interrumpen el flujo suave del material fundido, tienden a crear defectos superficiales y ocasionan la concentración de los esfuerzos en la pieza terminada.
➢ ***Agujeros:*** Es muy factible que ocurran en los moldeos de plástico, pero complican el diseño del molde y la remoción de la pieza. También generan interrupciones en el flujo del material fundido.
➢ ***Ahusado:*** Una pieza moldeada debe diseñarse con un ahusado en sus lados para facilitar la remoción del molde. Esto tiene importancia especial en la pared interior de una pieza en forma de taza, porque el plástico moldeado se contrae contra la forma positiva del molde. El ahusado recomendable para los termofijos es alrededor de 1/2º a 1º; para

los termoplásticos, por lo general varía entre 1/8º y 1/2º. Los proveedores de compuestos de plástico para moldeo proporcionan valores recomendados del ahusado para sus productos.

➢ ***Tolerancias:*** Especifican las variaciones permisibles de la manufactura de una pieza. Aunque la contracción es predecible en condiciones muy controladas, son deseables tolerancias generosas para los moldeos por inyección debido a la variación de los parámetros del proceso que afectan la contracción, y a la diversidad de formas geométricas que existen para las piezas. En la tabla 13.2 se listan las tolerancias comunes para las dimensiones de piezas moldeadas con plásticos seleccionados.

TABLA 13.2 Tolerancias comunes para las piezas moldeadas para plásticos seleccionados.

	Tolerancias para [a]	
Plástico	Dimensión de 50 mm (2.0 in)	Agujero de 10 mm (3/8 de in)
Termoplástico:		
ABS	± 0.2 mm (± 0.007 in)	± 0.08 mm (± 0.003 in)
Polietileno	± 0.3 mm (± 0.010 in)	± 0.13 mm (± 0.005 in)
Poliestireno	± 0.15 mm (± 0.006 in)	± 0.1 mm (± 0.004 in)
Termofijo:		
Epóxicos	± 0.15 mm (± 0.006 in)	± 0.05 mm (± 0.002 in)
Fenoles	± 0.2 mm (± 0.008 in)	± 0.08 mm (± 0.003 in)

Los valores representan la práctica comercial del moldeo. Recopilados de las referencias [3], [7], [14] y [18].

[a] Para tamaños pequeños, las tolerancias pueden reducirse. Para tamaños más grandes, se requieren tolerancias más generosas.

REFERENCIAS

[1] Baird, D. G. y Collias, D. I., ***Polymer Processing Principles and Design,*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1998.

[2] Billmeyer, Fred, W., Jr. ***Textbook of Polymer Science,*** 3a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.

[3] Bralla, J. G. (editor en jefe), ***Design for Manufacturability Handbook,*** 2a ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[4] Briston, J. H., ***Plastic Films,*** 3a ed., Longman Group U.K., Ltd., Essex, Inglaterra, 1989.

[5] Chanda, M. y Roy, S. K., ***Plastics Technology Handbook,*** Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1998.

[6] Charrier, J-M, ***Polymeric Materials and Processing,*** Oxford University Press, Nueva York, 1991.

[7] ***Engineering Materials Handbook, Vol. 2, Engineering Plastics,*** ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.

[8] Hall, C., ***Polymer Materials,*** 2a ed., John Wiley & Sons. Nueva York, 1989.

[9] Hensen, F. (ed.), ***Plastic Extrusion Technology,*** Hanser Publishers, Munich, FRG, 1988. (Distribuido en Estados Unidos por Oxford University Press, Nueva York).

[10] McCrum, N. G., Buckley, C. P., y Bucknall, C. B., ***Principles of Polymer Engineering,*** 2a ed., Oxford University Press, Oxford, U.K., 1997.

[11] ***Modern Plastics Encyclopedia,*** Modern Plastics, McGraw-Hill, Inc., Hightstown, Nueva Jersey, 1991.

[12] Morton-Jones, D. H., ***Polymer Processing,*** Chapman and Hall, Londres, U.K., 1989.

[13] Pearson, J. R. A., ***Mechanics of Polymer Processing,*** Elsevier Applied Science Publishers, Londres, 1985.

[14] Rubin, I. I., ***Injection Molding: Theory and Practice,*** John Wiley & Sons, Nueva York, 1973.

[15] Rudin, A., ***The Elements of Polymer Science and Engineering,*** 2a. ed., Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 1999.

[16] Sweeney, F. M., ***Reaction Injection Molding Machinery and Processes,*** Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1987.

[17] Tadmor, Z. y Gogos, C. G., ***Principles of Polymer Processing,*** John Wiley & Sons, Nueva York, 1979.

[18] Wick, C., Benedict, J. T. y Veilleux, R. F., ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., vol II: ***Forming***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1984, capítulo 18.

PREGUNTAS DE REPASO

13.1. ¿Cuáles son algunas de las razones por las que son importantes los procesos de conformado de plásticos?

13.2. Identifique las categorías principales de los procesos para conformar plásticos, según se clasifican por la configuración geométrica del producto resultante.

13.3. En los procesos de conformación de plásticos, la viscosidad es una propiedad importante de un polímero fundido. ¿De qué parámetros depende la viscosidad?

13.4. ¿En qué difiere la viscosidad de un polímero fundido de la mayor parte de fluidos newtonianos?

13.5. ¿Qué significa viscoelasticidad, si se aplica a un polímero fundido?
13.6. Defina la expansión del troquel en el proceso de la extrusión.
13.7. Describa brevemente el proceso de extrusión de plástico.
13.8. El barril y tornillo de un extrusor por lo general se dividen en tres secciones; identifique cada una de ellas.
13.9. ¿Cuáles son las funciones del paquete de la pantalla y placa rompedora en el extremo del troquel del barril extruidor?
13.10. ¿Cuáles son las diversas formas extruidas y los troqueles correspondientes?
13.11. ¿Cuál es la diferencia entre hoja y película de plástico?
13.12. ¿Cuál es el proceso de soplar película para producir ésta?
13.13. Describa el proceso de calandrado.
13.14. Las fibras y filamentos de polímero se utilizan en varias aplicaciones; ¿cuál de éstas es la de mayor importancia comercial?
13.15. Técnicamente, ¿cuál es la diferencia entre una fibra y un filamento?
13.16. Entre los materiales de fibra sintéticos, ¿cuáles son los más importantes?
13.17. Describa brevemente el proceso de moldeo por inyección.
13.18. Una máquina de moldeo por inyección se divide en dos componentes principales; identifíquelas.
13.19. ¿Cuáles son los dos tipos básicos de unidades de sujeción?
13.20. ¿Cuáles son las funciones de las puertas en los moldes de inyección?
13.21. ¿Cuáles son las ventajas de un molde de tres placas sobre uno de dos, en el moldeo por inyección?
13.22. Analice algunos de los defectos que ocurren en el moldeo por inyección de plástico.
13.23. Describa el moldeo de espuma estructural.
13.24. ¿Cuáles son las diferencias significativas en el equipo y procedimientos de operación entre el moldeo por inyección de termoplásticos y el moldeo por inyección de termofijos?
13.25. ¿Qué es moldeo por inyección de reacción?
13.26. ¿Qué clase de artículos se producen por medio del moldeo soplado?
13.27. ¿Cuál es la forma del material de inicio en el termoformado?
13.28. En el termoformado, ¿cuál es la diferencia entre un molde positivo y uno negativo?
13.29. ¿Por qué los moldes del termoformado mecánico por lo general son más costosos que en el de presión o vacío?
13.30. ¿Cuáles son los procesos con los que se producen las espumas de polímero?
13.31. ¿Cuáles son algunas de las consideraciones generales que los diseñadores de productos deben tener en cuenta al diseñar componentes hechos de plástico?
13.32. (**Video**) De acuerdo con el video sobre moldeo por inyección, ¿cuáles son los cuatro elementos principales que influyen en dicho proceso?
13.33. (**Video**) Según el video de moldeo por inyección, mencione los cuatro tipos más comunes en la industria del diseño de moldes.
13.34. (**Video**) En relación con el video de moldeo por inyección, ¿cuál es el tipo más común de máquina que se usa en la industria para dicho proceso?
13.35. (**Video**) De acuerdo con el video de moldeo por soplado, ¿qué materiales se utilizan en ese proceso? Mencione tres.
13.36. (**Video**) Liste los cuatro procesos más comunes de moldeo por soplado, según el video respectivo.
13.37. (**Video**) Liste las etapas del moldeo con soplado por extrusión, de acuerdo con el video correspondiente.
13.38. (**Video**) Mencione los cuatro tipos de operaciones de acabado de los plásticos, de acuerdo con el video sobre ese tema.
13.39. (**Video**) ¿Cuáles son los diferentes procesos que se emplean para aplicar decoraciones a las piezas de plástico, según el video sobre el tema?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 29 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

13.1. Al movimiento hacia delante de un polímero fundido en un barril extrusor le opone resistencia el flujo por arrastre, que es ocasionado por la resistencia a pasar por el orificio del troquel: ¿es *a*) verdadero o *b*) falso?
13.2. ¿Cuáles de las siguientes son secciones de un barril extrusor convencional para termoplásticos? (tres respuestas son las mejores): *a*) sección de compresión, *b*) sección del troquel, *c*) sección de alimentación, *d*) sección de calentamiento, *e*) sección de medición y *f*) sección de conformado.
13.3. ¿Cuáles de los procesos siguientes se asocian con la producción de hoja y película de plástico? (hay tres respuestas correctas): *a*) proceso de extrusión de película soplada, *b*) calandrado, *c*) extrusión por rodillo frío, *d*) método del bisturí, *e*) hilado, *f*) termoformado o *g*) moldeo por transferencia.
13.4. ¿Cuáles de los siguiente son los dos componentes principales de una máquina de moldeo por inyección?: *a*) unidad de sujeción, *b*) tolva, *c*) unidad de inyección, *d*) molde y *e*) unidad de eyección de la pieza.

13.5. ¿Cuál de las siguientes es la línea de separación en el moldeo por inyección?: *a*) líneas que se forman donde el polímero fundido se encuentra después de fluir alrededor de un núcleo en el molde, *b*) las secciones estrechas de la puerta donde las piezas se separan del vaciadero, *c*) donde la unidad de abrazaderas se une con la de inyección en la máquina moldeadora o *d*) donde se unen las dos mitades del molde.

13.6. ¿Cuál de las siguientes es la función del sistema de eyección?: *a*) mover el polímero fundido hacia la cavidad del molde, *b*) abrir las mitades del molde después de llenarse la cavidad, *c*) retirar las piezas moldeadas del sistema de vaciadero después del moldeo o *d*) separar la pieza de la cavidad después del moldeo.

13.7. ¿Cuáles de las ventajas siguientes ofrece un molde de tres placas, en comparación con uno de dos? (dos respuestas son las mejores): *a*) separación automática de las piezas de los vaciaderos, *b*) la puerta por lo general está en la base de la pieza para reducir las líneas de soldadura, *c*) el bebedero no se solidifica y *d*) piezas moldeadas más fuertes.

13.8. ¿Cuáles de los siguientes defectos o problemas se asocian con el moldeo por inyección? (tres respuestas son las correctas: *a*) bambú, *b*) expansión del troquel, *c*) flujo por arrastre, *d*) rebabas, *e*) fractura fundida, *f*) disparos cortos o *g*) marcas de hundimiento.

13.9. En el moldeo rotacional, la fuerza centrífuga se usa para forzar al polímero fundido contra las superficies de la cavidad del molde en que ocurre la solidificación: ¿es *a*) verdadero o *b*) falso?

13.10. ¿El uso de un parison se asocia con cuál de los siguientes procesos para dar forma a los plásticos?: *a*) moldeo por inyección doble, *b*) moldeo por soplado, *c*) moldeo por compresión, *d*) termoformado de presión o *e*) moldeo sándwich.

13.11. ¿Cuál de las denominaciones siguientes recibe el molde termoformado con forma convexa? (puede haber más de una): *a*) troquel, *b*) molde negativo, *c*) molde positivo o *d*) molde de tres placas.

13.12. El término encapsulamiento, ¿se refiere a cuál de los procesos siguientes para dar forma a los plásticos?: *a*) fundición, *b*) moldeo por compresión, *c*) extrusión de formas huecas, *d*) moldeo por inyección en el que un inserto de metal se introduce en la pieza moldeada o *e*) termoformado al vacío con molde positivo.

13.13. ¿Cuáles de las siguientes son las espumas de polímero más comunes?: *a*) poliacetato, *b*) polietileno, *c*) poliestireno, *d*) poliuretano y *e*) cloruro de polivinilo.

13.14. ¿En cuál de las categorías de propiedades que siguen es frecuente que las piezas de plástico se comparen en forma favorable con los metales? (dos respuestas son las mejores): *a*) resistencia al impacto, *b*) resistencia a la radiación ultravioleta, *c*) rigidez, *d*) resistencia, *e*) razón resistencia a peso o *f*) resistencia a la temperatura.

13.15. ¿Cuáles de los procesos siguientes por lo general se limitan a los polímeros termoplásticos? (dos respuestas son las mejores): *a*) moldeo por soplado, *b*) moldeo por compresión, *c*) moldeo por inyección de reacción, *d*) termoformado, *e*) moldeo por transferencia, *f*) recubrimiento de alambres.

13.16. ¿Cuáles de los procesos siguientes son aplicables a la producción de cascos de botes pequeños? (tres respuestas son las mejores): *a*) moldeo por soplado, *b*) moldeo por compresión, *c*) moldeo por inyección, *d*) moldeo rotacional o *e*) termoformado al vacío.

PROBLEMAS

Extrusión

13.1. El diámetro de un barril extrusor es de 65 mm, y su longitud es de 1.75 m. El tornillo gira a 55 rev/min. La profundidad del canal del tornillo es de 5.0 mm y el ángulo de las cuerdas es de 18º. La presión piezométrica en el troquel en el extremo del barril es de 5.0×10^6 Pa. La viscosidad del polímero fundido se da como de 100 Pas. Encuentre el gasto volumétrico del plástico en el barril.

13.2. Un extrusor tiene un diámetro de 5.0 in y una razón de longitud a diámetro de 26. El barril calienta el polipropileno a 450 ºF, lo que da una viscosidad al líquido fundido de 0.0025 lb-s/in^2. La separación de las cuerdas del tornillo es de 4.2 in, y la profundidad del canal es de 0.15 in. Durante la operación, el tornillo gira a 50 rev/min, y se genera una presión piezométrica de 450 lb/in^2. ¿Cuál es el gasto volumétrico del polipropileno desde el troquel en el extremo del barril?

13.3. Un barril extrusor tiene un diámetro de 110 mm y una longitud de 3.0 m. La profundidad del canal del tornillo es de 7.0 mm, y la separación entre sus cuerdas es de 95 mm. La viscosidad del polímero fundido es de 105 Pas, y la presión piezométrica en el barril es de 4.0 MPa. ¿Cuál es la velocidad rotacional del tornillo que se requiere para lograr un gasto volumétrico de 90 cm^3/s?

13.4. Un extrusor tiene un diámetro de barril de 2.5 in y longitud de 6.0 ft. El tornillo tiene una profundidad de canal de 0.25 in, un ángulo de cuerdas de 20º y gira a 55 rev/min. El material que se extruye es polipropileno. Con las especificaciones presentes, el gasto volumétrico del polímero fundido es de 1.50 in^3/s y la presión piezométrica es de 500 lb/in^2. *a*) Con estas características de operación, ¿cuál es la viscosidad del polipropileno? *b*) Con el uso de la figura 13.2, diga la temperatura aproximada en °F del polipropileno.

13.5. Un extrusor tiene un diámetro de 80 mm y longitud de 2.0 m. Su tornillo tiene una profundidad de canal de 5 mm, ángulo de cuerdas de 18 grados y gira a 1 rev/s. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante de 150 Pas. Determine la característica del extrusor con el cálculo de $Q_{máx}$ y $p_{máx}$, y luego encuentre la ecuación de la línea recta entre esos valores.

13.6. Determine el ángulo A de la hélice de modo que la separación entre las cuerdas del tornillo p sea igual al diámetro de este D. En la extrusión de plásticos, esto se llama el ángulo "cuadrado", aquel que provee un avance de las cuerdas igual a un diámetro por cada rotación del tornillo.

13.7. Un barril extrusor tiene un diámetro de 2.5 in. El tornillo gira a 60 rev/min, la profundidad de su canal es de 0.20 in y el ángulo de sus cuerdas de 17.5º. La presión piezométrica en el extremo del troquel del barril es de 800 lb/in^2 y la longitud de éste es de 50 in. La viscosidad del polímero fundido es de 122×10^{-4} lib-s/in^2. Determine el gasto volumétrico del plástico en el barril.

13.8. Un barril extrusor tiene un diámetro de 4.0 in y una razón L/D de 28. La profundidad del canal del tornillo es de 0.25 in y la separación de sus cuerdas es de 4.8 in. Gira a 60 rev/min. La viscosidad del polímero fundido es de 100×10^{-4} lb-s/in^2. ¿Cuál es la presión piezométrica que se requiere para obtener un gasto volumétrico de 150 in^3/min?

13.9. Una operación de extrusión produce tubería continua con diámetro exterior de 2.0 in e interior de 1.7 in. El barril extrusor tiene un diámetro de 4.0 in y longitud de 10 ft. El tornillo gira a 50 rev/min; tiene una profundidad de canal de 0.25 in y ángulo de cuerdas de 16º. La presión piezométrica tiene un valor de 350 lb/in^2 y la viscosidad del polímero es de 80×10^{-4} lb-s/in^2. En estas condiciones, ¿cuál es la tasa de producción en longitud de tubo/min si se supone que el extruido se empuja a una tasa que elimina el efecto de la expansión del troquel (es decir, el tubo tiene los mismos diámetros exterior e interior que el perfil del troquel)?

13.10. Un extrusor tiene un barril con diámetro y longitud de 100 mm y 2.8 m, respectivamente. La velocidad rotacional del tornillo es de 50 rev/min, profundidad de canal de 7.5 mm y ángulo de cuerdas de 17°. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante de 175 Pas. Determine: *a*) la característica del extrusor, *b*) el factor de forma K_s, para una abertura circular de troquel con diámetro de 3.0 mm y longitud de 12.0 mm y *c*) el punto de operación (Q y p).

13.11. Para el problema 13.10, suponga que el material es acrílico. *a*) Con el uso de la figura 13.2, determine la temperatura del polímero fundido, *b*) Si la temperatura baja a 20 ºC, estime la viscosidad resultante del polímero fundido. (*Orientación*: el eje y de la figura 13.2 está en escala logarítmica, no lineal).

13.12. Considere un extrusor en el que el diámetro del barril es de 4.5 in con longitud de 11 ft. El tornillo extrusor gira a 60 rev/min; tiene una profundidad de canal de 0.35 in y ángulo de cuerdas de 20º. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante de 125×10^{-4} lb-s/in^2. Determine: *a*) $Q_{máx}$ y $p_{máx}$; *b*) el factor de forma K_s para una abertura circular en el troquel, en la que $D_d = 0.312$ in y $L_d = 0.75$ in; y *c*) los valores de Q y p en el punto de operación.

13.13. Un extrusor tiene un diámetro de barril de 5.0 in y longitud de 12 ft. El tornillo extrusor gira a 50 rev/min; tiene profundidad de canal de 0.30 in y ángulo de cuerdas de 17.7º. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante de 100×10^{-4} lb-s/in^2. Calcule: *a*) la característica del extrusor, *b*) los valores de Q y p en el punto de operación, dado que la característica del troquel es $Q_x = 0.00150\,p$.

13.14. Un extrusor tiene un barril con diámetro de 3.5 in y longitud de 5.0 ft. La profundidad del canal del tornillo es de 0.16 in y ángulo de cuerdas de 22º. El tornillo extrusor gira a 75 rev/min. El polímero fundido tiene una viscosidad cortante de 65×10^{-4} lb-s/in^2 a la temperatura de operación de 525 ºF. La gravedad específica del polímero es de 1.2, y su resistencia a la tensión es de 8 000 lb/in^2. Se extruye una sección transversal en forma de T a razón de 0.11 lb/s. La densidad del agua es de 62.5 lb/ft^3. *a*) Encuentre la ecuación para la característica del extrusor. *b*) Determine el punto de operación (Q y p), y *c*) la característica del troquel indicada por el punto de operación.

Moldeo por inyección

13.15. Calcule el porcentaje de contracción volumétrica de una pieza moldeada de polietileno, con base en el valor de contracción que se da en la tabla 13.1.

13.16. La dimensión especificada para cierta pieza moldeada por inyección hecha de ABS es de 225.00 mm. Calcule la dimensión correspondiente a la que debe maquinarse la cavidad del molde, con el uso del valor de contracción que se da en la tabla 13.1.

13.17. La dimensión de cierta pieza moldeada por inyección hecha de policarbonato se especifica como de 3.75 in. Calcule la dimensión correspondiente a la que debe maquinarse la cavidad del molde, con el uso del valor de contracción que se da en la tabla 13.1.

13.18. El supervisor en un departamento de moldeo por inyección dice que una de las piezas de polipropileno producida en una de las operaciones tiene una contracción mayor de la que los cálculos indican que debería tener. La dimensión importante de la pieza se especifica como de 112.5 ± 0.25 mm. Sin embargo, la pieza real moldeada mide 112.02 mm. *a*) Como primer paso, debe revisarse la dimensión correspondiente de la cavidad del molde. Calcule el valor correcto de la dimensión del molde, dado que el valor de contracción para el polietileno es de 0.025 (de la tabla 13.1), *b*) ¿Qué ajustes deben hacerse en los parámetros del proceso para reducir la cantidad de contracción?

13.19. Una pieza de polietileno moldeada por inyección tiene una dimensión de 2.500 in. En el mismo molde se usa un material nuevo de policarbonato. ¿Cuál es la dimensión esperada correspondiente del moldeo con policarbonato?

Otras operaciones de moldeo y termoformado

13.20. El troquel de extrusión para un parison de polietileno que se usa en el moldeo por soplado tiene un diámetro medio de 18.0 mm. El tamaño del anillo que abre el troquel es de 2.0 mm. Se observa que el diámetro medio del parison se expande a un tamaño de 21.5 mm después de salir del orificio del troquel. Si el diámetro del contenedor moldeado por soplado ha de ser de 150 mm, determine *a*) el espesor de pared correspondiente del contenedor y *b*) el espesor de pared del parison.

13.21. Una operación de moldeo por soplado produce una botella de 6.25 in de diámetro a partir de un parison que se extruye en un troquel cuyo diámetro exterior es de 1.25 in e interior de 1.0 in. La razón observada de expansión del diámetro es de 1.24. ¿Cuál es la presión máxima de aire que debe usarse si la fuerza al esfuerzo máximo permisible para el polímero es de 1 000 lb/in^2?

13.22. Un parison se extruye desde un troquel con diámetro exterior de 11.5 mm e interior de 7.5 mm. La expansión observada del troquel es de 1.25. El parison se usa para moldear por soplado el contenedor de una bebida cuyo diámetro exterior es de 112 mm (tamaño estándar de una botella de refresco de 2 litros). *a*) ¿Cuál es el espesor de pared correspondiente del contenedor? *b*) Obtenga una botella vacía de plástico de refresco de 2 litros y córtela (con cuidado) a través de su diámetro. Con el uso de un micrómetro mida el espesor de pared y compárelo con su respuesta para el inciso *a*).

13.23. Una operación de moldeo por soplado se utiliza para producir una botella con diámetro de 2.250 in y espesor de pared de 0.045. El parison tiene un espesor de 0.290 in. La presión que se usa para inflar el parison es de 38.0 lb/in^2. La razón observada de expansión del troquel es de 1.30. *a*) ¿Cuál es el diámetro requerido del parison? *b*) ¿Cuál es el diámetro del troquel? *c*) ¿Cuál es el esfuerzo a la tensión en la botella conforme alcanza su tamaño inflado?

13.24. Una operación de extrusión se utiliza para producir un parison cuyo diámetro medio es de 27 mm. Los diámetros interior y exterior del troquel que produce el parison son 18 mm y 22 mm, respectivamente. Si el espesor de pared mínimo del contenedor moldeado por soplado ha de ser de 0.40 mm, ¿cuál es el diámetro máximo posible del molde soplado?

13.25. Una operación de moldeo rotacional va a usarse para moldear una pelota hueca hecha de polipropileno. La pelota tendrá un diámetro de 1.25 ft y el espesor de su pared debe ser 3/32 in. ¿Cuál es el peso del polvo PE que debe cargarse en el molde a fin de cumplir esas especificaciones? La gravedad específica del grado PE es de 0.90 y la densidad del agua es de 62.4 lb/ft^3.

13.26. El problema en cierta operación de termoformado es que hay demasiado adelgazamiento de las paredes de una pieza grande en forma de taza. La operación es de termoformado a presión convencional que usa un molde positivo, y el plástico es una hoja ABS con espesor inicial de 3.2 mm. *a*) ¿Por qué ocurre el adelgazamiento en las paredes de la taza? *b*) ¿Qué cambios podrían hacerse en la operación, a fin de corregir el problema?

14 TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DEL CAUCHO (HULE)

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Muchos de los procesos que se usan para dar forma a los plásticos (capítulo 13) también son aplicables a los cauchos. Sin embargo, en ciertos aspectos la tecnología del procesamiento del caucho es diferente, y la industria de éste está muy separada de la del plástico. La industria del caucho y de los bienes elaborados con éste se encuentra dominada por un solo producto: las llantas (neumáticos). Éstas se emplean en gran número para automóviles, camiones, aeronaves y bicicletas. Aunque las llantas datan de finales de la década de 1880, la tecnología del caucho puede rastrearse hasta el descubrimiento de la vulcanización en 1839 (nota histórica 8.2), proceso por el que el caucho natural se transforma en un material útil por medio del entrecruzamiento de las moléculas del polímero. Durante su primer siglo, la industria del caucho sólo tenía que ver con el procesamiento de caucho natural. Durante la Segunda Guerra Mundial se inventaron los cauchos sintéticos (nota histórica 8.3); hoy día éstos constituyen la mayoría de la producción de caucho.

14.1 PROCESAMIENTO Y FORMADO DEL CAUCHO

La producción de artículos de caucho se divide en dos etapas básicas: 1) producción del caucho en sí, y 2) procesamiento de éste para obtener artículos terminados. La producción de caucho difiere, en función de si es natural o sintético. La diferencia se debe a la fuente

de las materias primas. El caucho natural (NR, por sus siglas en inglés) se produce como cultivo agrícola, en tanto que la mayoría de los sintéticos se fabrican a partir del petróleo.

A la producción de caucho sigue su procesamiento hacia los productos finales; éste consiste en 1) composición, 2) mezcla, 3) formación y 4) vulcanización. Las técnicas de procesamiento para cauchos naturales y sintéticos son virtualmente las mismas, las diferencias están en los productos químicos que se emplean para hacer la vulcanización (entrecruzamiento). Esta secuencia no se aplica a los elastómeros termoplásticos, cuyas técnicas de formado son las mismas que para los demás polímeros termoplásticos.

Hay varias industrias diferentes involucradas en la producción y procesamiento del caucho. La producción de caucho crudo natural puede clasificarse como industria agrícola, puesto que el látex, ingrediente de inicio del caucho natural, se cultiva en plantaciones extensas ubicadas en climas tropicales. Por el contrario, los cauchos sintéticos los produce la industria petroquímica. Por último, el procesamiento de estos materiales en forma de llantas, suelas de calzado y otros productos de caucho tiene lugar en plantas procesadoras (fábricas). Las procesadoras se conocen por lo común como industria del caucho. Algunos de los nombres principales en esta industria incluyen los de Goodyear, B. F. Goodrich y Michelin. La importancia de las llantas se ve reflejada en estos nombres.

14.1.1 Producción de caucho

En esta sección se estudia brevemente la producción de caucho antes de que pase al procesador. El análisis diferencia el caucho natural del sintético.

Caucho natural El caucho natural se obtiene de árboles (hules) de caucho (***Hevea brasiliensis***) en forma de látex. Los árboles se cultivan en plantaciones del sureste de Asia y otras partes del mundo. El látex es una dispersión coloidal de partículas sólidas del polímero poliisopreno (sección 8.4.2) en agua. El poliisopreno es la sustancia química que incluye al caucho, y la emulsión lo contiene en 30%. El látex se almacena en tanques grandes, donde se mezcla el producto de varios árboles.

El método preferido de obtención del caucho a partir del látex involucra la coagulación. Primero se diluye el látex con agua a cerca de la mitad de su concentración natural. Se agrega un ácido como el fórmico (HCOOH) o acético (CH_3COOH) para hacer que el látex se coagule al cabo de 12 horas. El coágulo, ahora en forma de trozos sólidos suaves, se exprime a través de una serie de rodillos que expulsan la mayor parte del agua y reducen el espesor a 3 mm (1/8 in). Los últimos rodillos tienen muescas que le dan un patrón cuadriculado a las hojas resultantes. Luego, éstas se comprimen sobre marcos de madera para secarlas en ahumaderos. El humo caliente contiene creosota, que impide la formación de moho y la oxidación del caucho. Normalmente se requieren varios días para terminar el proceso de secado. El caucho resultante, ahora en una forma llamada ***hoja ahumada acanalada***, se pliega en pacas grandes para su envío al procesador. Este caucho natural tiene un color café oscuro característico. En ciertos casos, las hojas se secan con aire caliente en vez de ahumadores por lo que se aplica el término ***hoja secada al aire***; se considera que éste es el mejor grado de caucho. Un grado aún mejor, denominado ***crespón o crepé pálido***, involucra dos etapas de coagulación; la primera retira los componentes indeseables del caucho, y el coágulo que resulta se sujeta luego a un lavado más intenso y a un procedimiento de trabajo mecánico, seguido por el secado con aire caliente. El color del crespón pálido de caucho se parece al del tostado claro.

Caucho sintético Los distintos tipos de caucho sintético se identifican en la sección 8.4.3. La mayor parte de sintéticos se producen a partir del petróleo con las mismas técnicas de polimerización que se emplean para sintetizar otros polímeros (sección 8.1.1). Sin embargo, a diferencia de los polímeros termoplásticos y termofijos, que se entregan al fabricante en su presentación normal de pellets o resinas líquidas, los cauchos sintéticos se le dan a los

procesadores en forma de pacas grandes. La industria ha implantado una larga tradición de manejar el caucho natural en estas unidades de carga.

14.1.2 Composición

El caucho se compone con aditivos. Es con la composición que el caucho específico se diseña para satisfacer la aplicación dada en términos de propiedades, costo y susceptibilidad de procesamiento. La composición agrega productos químicos para la vulcanización. El azufre se ha utilizado tradicionalmente para este propósito. El proceso de vulcanización y los productos químicos que se emplean para efectuarla se estudian en la sección 14.1.5.

Los aditivos incluyen productos de relleno que actúan tanto para mejorar las propiedades mecánicas del caucho (rellenos reforzadores) como para mezclarlo y reducir su costo (rellenos no reforzadores). El relleno simple más importante de los cauchos es el ***negro de humo***, forma coloidal del carbono, de color negro, que se obtiene por descomposición térmica de los hidrocarburos (hollín). Su efecto es incrementar la resistencia a la tensión, a la abrasión y a la separación del producto final. El negro de humo también da protección contra la radiación ultravioleta. Estas mejoras tienen especial importancia para las llantas. La mayoría de las piezas de caucho son de color negro debido a su contenido de negro de humo.

Aunque el negro de humo es el relleno más importante, también se usan otros. que incluyen arcillas chinas, silicatos hidratados de aluminio ($Al_2Si_2O_5(OH_4)$), que proporcionan menos refuerzo que el negro de humo pero se usan cuando el color negro no resulta aceptable; el carbonato de calcio ($CaCO_3$), que es un relleno no reforzador; y el sílice (SiO_2), que tiene funciones de reforzador o no reforzador, en función del tamaño de sus partículas; y otros polímeros como el estireno, PVC y fenoles. También se agrega caucho recuperado (reciclado) como relleno en ciertos productos, pero por lo general no excede la proporción de 10%.

Otros aditivos de la composición del caucho incluyen antioxidantes para retardar el envejecimiento por oxidación, productos químicos que dan protección contra la fatiga, y el ozono, pigmentos, aceites plastificadores y suavizantes, agentes de soplado para producir hule espuma y compuestos antiadherentes para liberarlo del molde.

Muchos productos requieren filamentos de refuerzo para reducir la extensibilidad y conservar otras propiedades deseables del caucho. Ejemplos notables de esto son las llantas y las bandas transportadoras. Los filamentos que se usan para este propósito incluyen celulosa, naylon y poliéster. La fibra de vidrio y acero también se emplean como refuerzo (por ejemplo, llantas radiales con cinturones de acero). Estos materiales de fibra continua deben agregarse como parte del proceso de dar forma; no se mezclan con los demás aditivos.

14.1.3 Mezcla

Los aditivos deben mezclarse por completo con el caucho base para obtener una dispersión uniforme de los ingredientes. Los cauchos sin curar tienen viscosidad elevada. El trabajo mecánico que experimenta el caucho llega a incrementar su temperatura hasta 150 ºC (300 ºF). Si los agentes de vulcanización estuvieran presentes desde que comienza la mezcla, ocurriría la vulcanización prematura, la pesadilla del procesador de caucho [6]. En consecuencia, por lo general se emplea un proceso de mezcla en dos etapas. En la primera de ellas, se combina negro de humo y otros aditivos no vulcanizadores con el caucho crudo. El término ***lote maestro*** se emplea para esta primera etapa de mezclado. Después de completada la mezcla, y habiéndose dado tiempo para que se enfríe, se efectúa la segunda etapa, en la que se agregan agentes vulcanizadores.

El equipo para mezclar incluye un molino de dos rodillos y mezcladores internos tales como el Banbury (figura 14.1). El ***molino de dos rodillos*** consiste en dos rodillos paralelos,

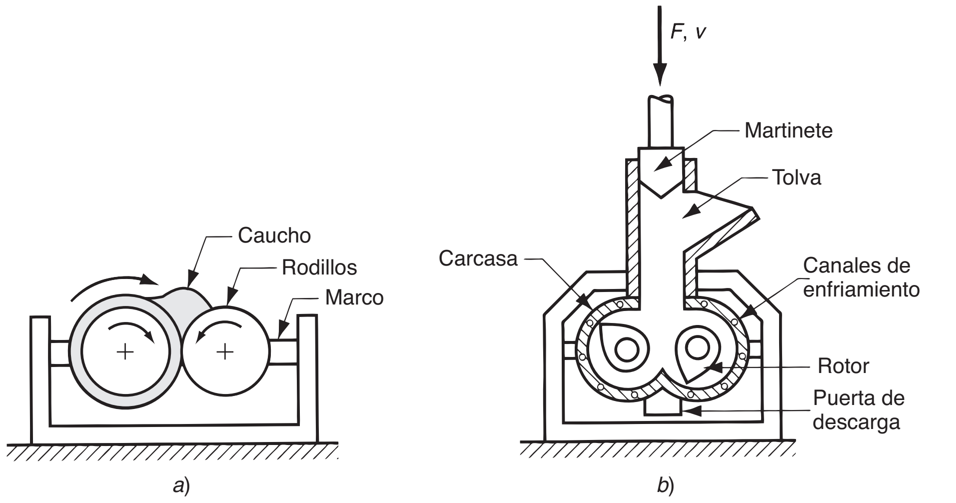


FIGURA 14.1 Mezcladores que se usan para procesar el caucho: *a*) molino de dos rodillos y *b*) mezclador interno tipo Banbury. Estas máquinas también se emplean para "masticar" el caucho natural.

apoyados en un marco de modo que pueden acercarse para obtener el "mordisco" (tamaño de la brecha) que se desea, y se hacen rotar con las mismas velocidades u otras ligeramente distintas. Un ***mezclador interno*** tiene dos rotores contenidos en una carcasa, como se aprecia en la figura 14.1*b*), para el mezclador interno tipo Banbury. Los rotores tienen navajas y giran en direcciones opuestas a velocidades diferentes, lo que ocasiona un patrón de flujo complejo de la mezcla que contiene.

14.1.4 Formación y procesos relacionados

Los procesos de formación de los productos de caucho se dividen en cuatro categorías básicas: 1) extrusión, 2) calandrado, 3) recubrimiento y 4) moldeo y fundición. La mayoría de estos procesos se estudió en el capítulo anterior. En éste se examinarán los temas especiales que surgen cuando se aplican al caucho. Ciertos productos requieren varios procesos básicos más un trabajo de ensamble en su manufactura; un ejemplo de lo anterior son las llantas.

Extrusión En el capítulo anterior se estudió la extrusión de polímeros. Para extruir el caucho, por lo general se emplean extrusores de tornillo. Igual que con la extrusión de plásticos termofijos, la razón *L/D* de los barriles extrusores es menor que la de los termoplásticos, y es común que esté en el rango de 10 a 15 para reducir el riesgo del entrecruzamiento prematuro. La dilatación del troquel ocurre con los extruidos de caucho, ya que el polímero se encuentra en una condición muy plástica y presenta la propiedad de memoria (original). Aún no ha sido vulcanizado.

Calandrado Este proceso implica pasar el material de caucho a través de una serie de espacios de tamaño decreciente entre un conjunto de rodillos rotatorios (sección 13.3). El proceso del caucho debe operarse a temperaturas más bajas que las de los polímeros termoplásticos para evitar la vulcanización prematura. Asimismo, el equipo que se emplea en la industria del caucho es más pesado que el que se usa para los termoplásticos, ya que aquél es más viscoso y difícil de conformar. La salida del proceso es una hoja de caucho de espesor determinado por el espacio final entre los rodillos; de nuevo, en la hoja se da la expansión, lo que hace que el espesor sea ligeramente mayor que el tamaño del espacio. También se emplea calandrado para recubrir o impregnar textiles para producir telas con caucho.

Hay problemas para producir hojas gruesas, sea por extrusión o calandrado. El control del espesor es difícil en el proceso original, y en el posterior ocurre un entrampamiento del aire. Estos problemas se resuelven en gran medida con la combinación de la extrusión y el calandrado en el proceso de ***troquel de rodillo*** (figura 14.2). El troquel extrusor es una rendija que alimenta a los rodillos de calandrado.

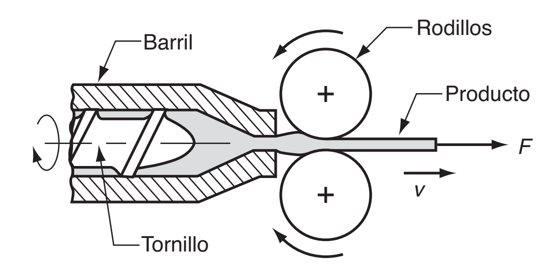


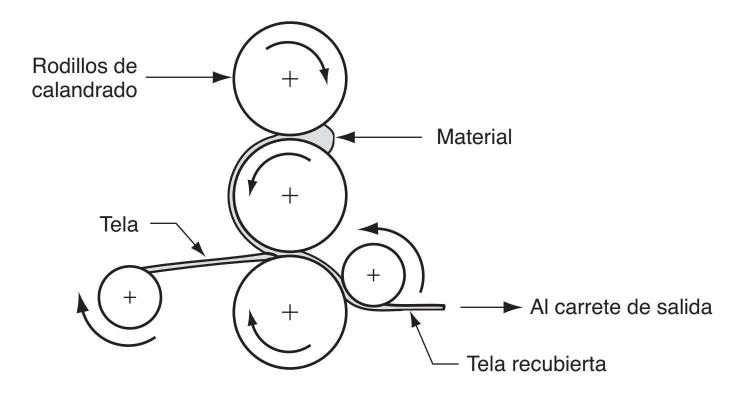
FIGURA 14.2 Proceso con troquel de rodillo para extruir caucho seguido de rolado.

Recubrimiento El recubrimiento o impregnación de telas con caucho es un proceso importante en la industria de éste. Estos materiales compuestos se emplean en las llantas para automóviles, bandas transportadoras, balsas inflables y telas impermeables para toldos, tiendas e impermeables. El ***recubrimiento*** de caucho sobre un sustrato de tela incluye varios procesos. Ya se vio que uno de los métodos para recubrir es el calandrado. La figura 14.3 ilustra una forma posible en la que se alimenta la tela a los rodillos del calandrado para obtener una hoja de caucho reforzado.

Las alternativas del calandrado incluyen desnatado, inmersión y rociado. En el proceso de ***desnatado***, se aplica una solución espesa de compuesto de caucho en un solvente orgánico a la tela conforme se desenrolla desde un carrete de abasto. La tela recubierta pasa por la herramienta de bisturí que desnata el solvente al espesor apropiado, y luego se lleva a una cámara de vapor en la que se quita el solvente por medio de calor. Como sugiere su nombre, la ***inmersión*** involucra inmersión temporal de la tela en una solución muy fluida de caucho, seguida por secado. De igual modo, en el ***rociado*** se utiliza una pistola para aplicar la solución de caucho.

Moldeo y fundición Los artículos moldeados incluyen suelas de zapato y tacones, juntas y sellos, copas de succión y tapas de botella. Muchas partes de caucho espumado (hule espuma) se producen con moldeo. Además, éste es un proceso importante en la producción de llantas. Los principales procesos de moldeo de caucho son: 1) por compresión, 2) por transferencia y 3) por inyección. El moldeo por compresión es la técnica más importante debido a su uso en la manufactura de llantas. La cura (vulcanización) se lleva a efecto en el molde con los tres procesos, lo que representa una diferencia de los métodos para dar forma que ya se estudiaron, y requiere de una etapa separada de vulcanización. Con el moldeo por inyección del caucho, hay riesgos de una cura prematura similar a la que se enfrenta en el mismo proceso cuando se aplica a plásticos termofijos. Las ventajas del moldeo por inyección sobre los métodos tradicionales para producir piezas de caucho incluyen un mejor control dimensional, y menor duración del ciclo. Además de su uso en el moldeo de cauchos convencionales, el moldeo por inyección también se aplica a elastómeros termoplásticos. Debido a los altos costos del molde, se requiere que el moldeo por inyección se justifique con grandes cantidades de producción.

FIGURA 14.3 Recubrimiento de tela con caucho, con el uso del proceso de calandrado.



Para producir guantes de caucho y zapatón de goma se utiliza una forma de fundición llamada ***fundición por inmersión***. Involucra la inmersión de un molde positivo en un polímero líquido (o una forma calentada en un plastisol) durante cierto tiempo (el proceso puede involucrar inmersiones repetidas) para formar el espesor deseado. Después se desmonta el recubrimiento de la forma y se cura para que haya entrecruzamiento del caucho.

14.1.5 Vulcanización

La ***vulcanización*** es el tratamiento que lleva a cabo el entrecruzamiento de las moléculas de elastómero, de modo que el caucho se vuelve más rígido y fuerte, pero mantiene su extensibilidad. La secuencia es de crucial importancia en el procesamiento del caucho. El proceso a escala submicroscópica se ilustra en la figura 14.4, en el que las moléculas de cadena larga del caucho se unen en ciertos puntos de enlace, el efecto de lo cual es reducir la capacidad que tiene el elastómero para fluir. Un caucho común suave tiene uno o dos entrecruzamientos por cada mil unidades (meros). Conforme el número de entrecruzamientos aumenta, el polímero se vuelve más rígido y se comporta más como plástico termofijo (caucho duro).

La vulcanización, inventada por Goodyear, involucra el uso de azufre (alrededor de ocho partes por peso de S mezcladas con 100 partes de caucho natural) a una temperatura de 140 ºC (280 ºF) durante unas cinco horas. En el proceso no entra ningún otro producto químico. Hoy día, la vulcanización con sólo azufre ya no se emplea más como tratamiento comercial, debido a los periodos largos de cura. Otros productos, incluso óxido de zinc (ZnO) y ácido esteárico ($C_{18}H_{36}O_2$), se combinan con dosis pequeñas de azufre a fin de acelerar y dar resistencia al tratamiento. El tiempo de cura resultante es de 15 a 20 minutos por llanta de un automóvil normal de pasajeros. Además, se han creado varios tratamientos de vulcanización sin azufre.

En los procesos de moldeo con caucho, la vulcanización se lleva a cabo en el molde; la temperatura de éste se mantiene en el nivel apropiado para la cura. En otros procesos de formado, la vulcanización se lleva a cabo después de que la pieza ha sido formada. Los tratamientos por lo general se dividen en procesos por lote y procesos continuos. Los métodos por lote incluyen el uso de un ***autoclave***, recipiente de presión calentado con vapor; y la ***cura con gas***, en el que un gas inerte como el nitrógeno cura al caucho. Muchos de los procesos básicos hacen un producto continuo, y si la salida no se corta en piezas discretas, es apropiado aplicar vulcanización continua. Los métodos continuos incluyen ***vapor a alta presión***, adecuado para curar el caucho que recubre alambre y cable; el ***túnel de aire caliente***, para extrusión celular y basamentos de carpeta [3]; y ***cura con tambor continuo***, en el que hojas continuas de caucho (por ejemplo, cinturones y materiales para pisos) pasan a través de uno o más rodillos calentados para efectuar la vulcanización.

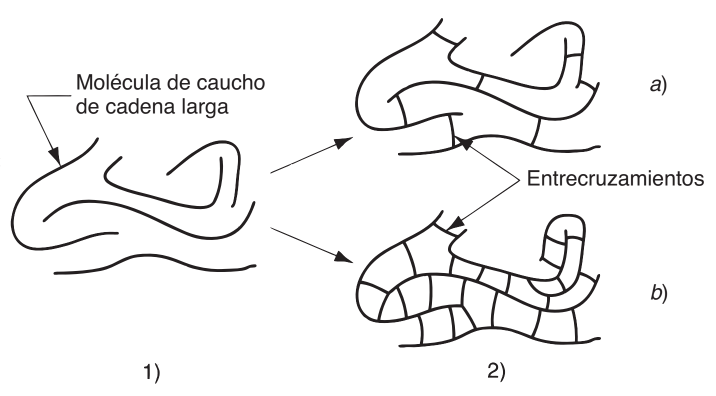


FIGURA 14.4 Efecto de la vulcanización sobre las moléculas de caucho: 1) caucho crudo; 2) caucho vulcanizado (entrecruzado). Las variantes de (2) incluyen: *a*) caucho suave, bajo grado de entrecruzamiento, y *b*) caucho duro, alto grado de entrecruzamiento.

14.2 MANUFACTURA DE LLANTAS Y OTROS PRODUCTOS DE CAUCHO

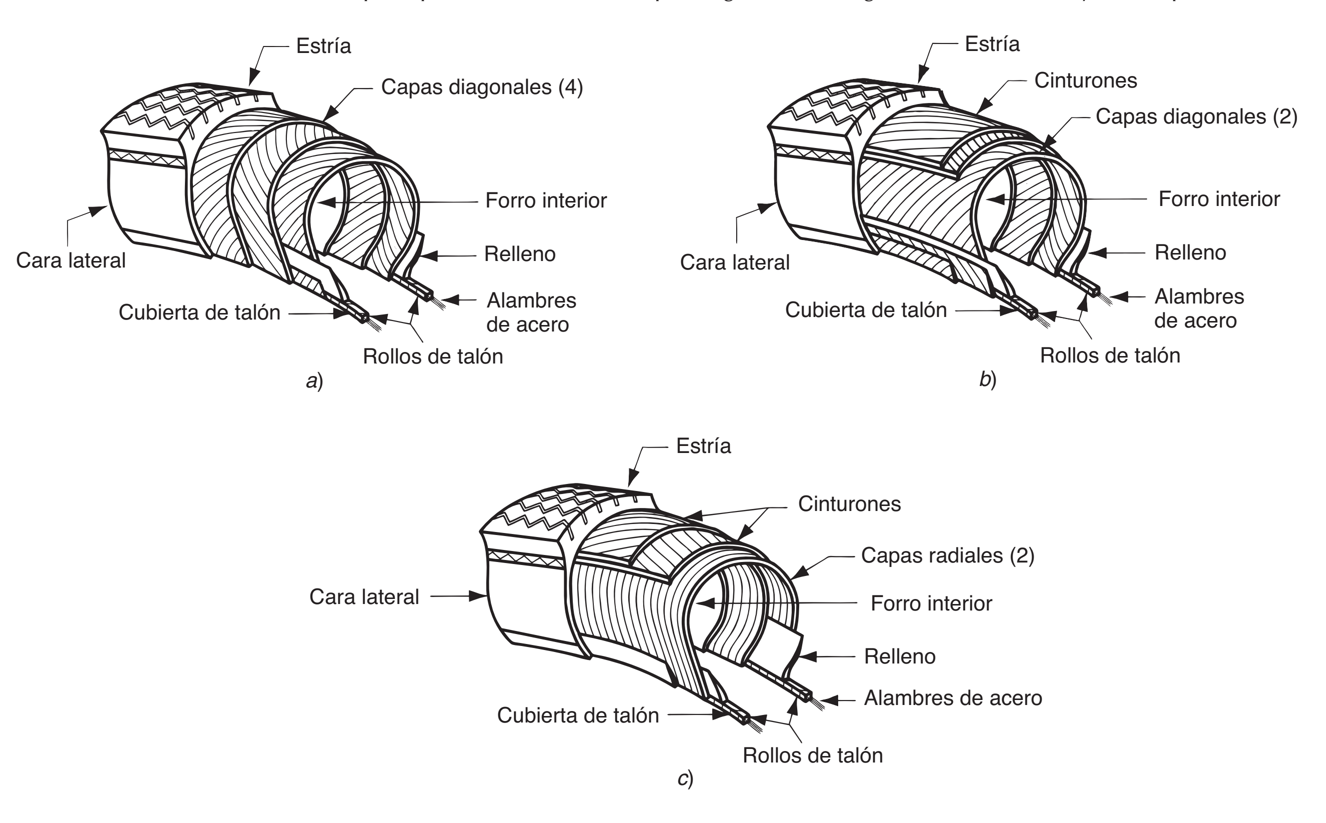
Las llantas son el producto principal de la industria del caucho, que contribuye con tres cuartas partes del tonelaje total. Otros productos importantes incluyen suelas, mangueras, bandas transportadoras, sellos, componentes para absorber choques, productos de caucho espumado y equipo deportivo.

14.2.1 Llantas

Las llantas neumáticas son componentes críticos de los vehículos en que se usan. Soportan el peso del carro y el de los pasajeros y carga a bordo; transmiten el par del motor para impulsar el vehículo y absorben las vibraciones del camino y los impactos para brindar un viaje confortable. Se utilizan llantas en automóviles, camiones, autobuses, tractores agrícolas, equipo para movimiento de tierras, vehículos militares, bicicletas, motocicletas y aviones.

Construcción de una llanta y secuencia de la producción Una llanta es el ensamble de muchas piezas, cuya manufactura es inesperadamente compleja. Una llanta de automóvil de pasajeros consiste en alrededor de 50 piezas individuales; la de un equipo grande para mover tierra puede llegar a tener 175. Para comenzar, hay tres construcciones básicas de llantas: *a*) de capas diagonales, *b*) diagonal con cinturones y *c*) de capas radiales, que se ilustran en la figura 14.5. En los tres casos, la estructura interna de la llanta, conocida como ***carcasa***, consiste en capas múltiples de cuerdas cubiertas de caucho, llamados ***capas***. Las cuerdas son tiras de varios materiales tales como naylon, poliéster, fibra de vidrio y acero, que quitan la elasticidad para reforzar al caucho en la carcasa. La ***llanta de capa diagonal*** tiene las cuerdas en forma diagonal, pero en direcciones perpendiculares en capas

FIGURA 14.5 Tres construcciones principales de llantas: *a*) de capas diagonales, *b*) diagonal con cinturones y *c*) de capas radiales.



adyacentes. Una llanta común en diagonal tiene cuatro pliegues. La ***llanta diagonal con cinturones*** está hecha de capas diagonales con sesgos opuestos, pero agrega varias capas alrededor de la periferia exterior de la carcasa. Estos ***cinturones*** incrementan la rigidez de la llanta en el área de estría y limitan su expansión diametral durante el inflado. Las cuerdas en el cinturón también corren en forma diagonal, como se indica en el esquema.

Una ***llanta radial*** tiene pliegues que corren en forma radial en vez de diagonal; también usa cinturones alrededor de la periferia para proveer apoyo. Una ***radial con cinturones de acero*** es una llanta en la que los cinturones de la circunferencia tienen cuerdas hechas de acero. La construcción radial proporciona una pared lateral más flexible que tiende a reducir el esfuerzo sobre los cinturones y estrías cuando se deforman de modo continuo o en contacto con la superficie plana del camino durante la rotación. Este efecto va acompañado de una vida más larga de las estrías, mejora la estabilidad al dar la vuelta y en el manejo, y da un agarre mejor a velocidades altas.

En cada tipo de construcción, la carcasa está cubierta de caucho sólido que alcanza un espesor máximo en el área de estrías; también está forrada por dentro con un recubrimiento de caucho. Para llantas con cámaras interiores, el forro interior es un recubrimiento delgado que se aplica a la capa más interna durante la fabricación. Para llantas sin cámaras, el forro interior debe tener permeabilidad baja, puesto que mantiene la presión del aire; por lo general se trata de un caucho laminado.

La producción de llantas se resume en tres etapas: 1) preformar los componentes, 2) construir la carcasa y agregar bandas de caucho para formar las paredes y superficies de estrías, y 3) moldear y curar los componentes en una pieza integral. Las descripciones de estas etapas que siguen son comunes; hay variantes en el proceso según la construcción, tamaño de llanta y tipo de vehículo en que se usará.

Preformar los componentes Como se muestra en la figura 14.5, la carcasa consiste en cierto número de componentes separados, la mayor parte de los cuales son caucho o caucho reforzado. Éstos, así como el caucho de la pared lateral y las estrías, se producen en procesos continuos y luego se cortan al tamaño y forma para el ensamble posterior. Los componentes, citados en la figura 14.5, y los procesos de preformado para fabricarlos son:

- ***Rollos de talón.*** Alambre de acero continuo recubierto de caucho, cortado, enrollado y con los extremos unidos.
- ***Capas.*** Tela continua (textil, naylon, fibra de vidrio, acero) cubierta de caucho en un proceso de calandrado y precortada al tamaño y forma.
- ***Forro interior.*** Para llantas con cámaras, el forro interior es con calandrado sobre la capa más interna. Para llantas sin cámara, el forro es calandrado como laminado de dos capas.
- ***Cinturones.*** Tela continua recubierta de caucho (como los pliegues, ya descritos), pero cortada en ángulos diferentes para tener mejor refuerzo; después se fabrica en cinturones multicapa.
- ***Estrías.*** Extruida como banda continua; después se corta y preensambla a los cinturones.
- ***Pared lateral.*** Se extruye como banda continua; luego se corta al tamaño y forma.

Construcción de la carcasa. La carcasa se ensambla por tradición con el uso de una máquina conocida como ***tambor de construcción***, cuyo elemento principal es un árbol cilíndrico que rota. Alrededor de éste se construyen bandas precortadas que forman la carcasa en un procedimiento paso a paso. Las capas sucesivas que forman la sección transversal de la llanta están fijados en los lados opuestos del aro por dos rollos doblados. Los ***rollos de talón*** consisten en filamentos múltiples de alambre de acero de alta resistencia. Su función es brindar un soporte rígido cuando la llanta se monta en el aro de la rueda. Con las capas y rollos de talón se combinan otros componentes. Éstos incluyen varias envolturas y piezas

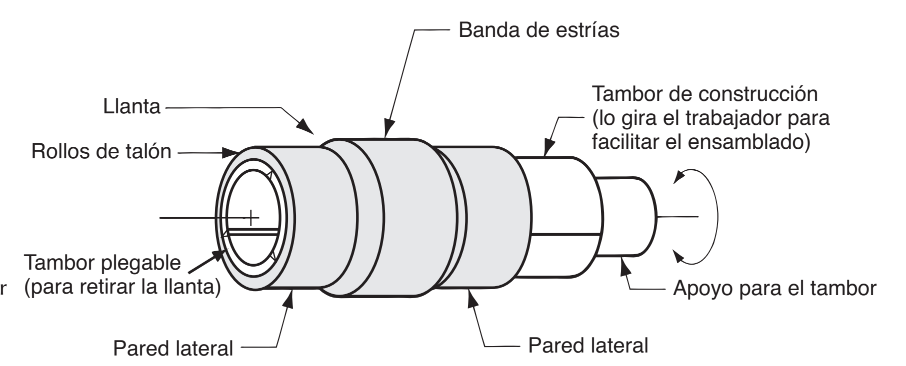


FIGURA 14.6 Llanta justo antes de retirarse del tambor de construcción, antes del moldeo y la cura.

de relleno para dar a la llanta la resistencia apropiada, resistencia al calor, retención de aire y ajuste al aro de la rueda. Después de que estas piezas han sido colocadas alrededor del árbol y se ha agregado el número apropiado de capas, se aplican los cinturones. A esto le sigue el caucho exterior, que se convertirá en la pared lateral y las estrías. En este punto del proceso, las estrías son bandas de caucho de sección transversal uniforme; el diseño de las estrías se agrega después, en el moldeo. El tambor de construcción es plegadizo, de modo que la llanta sin acabado puede retirarse una vez terminada. En esta etapa, la forma de la llanta es aproximadamente tubular, como se ilustra en la figura 14.6.

Moldeo y cura Los moldes de las llantas por lo general son elementos de dos piezas (moldes deslizantes) y contienen el patrón de estrías que ha de imprimirse en la llanta. El molde está remachado a una prensa, una mitad sujeta a la placa superior (la tapa) y la mitad inferior sujeta a la placa de abajo (la base). La llanta sin curar se coloca sobre el diafragma extensible y se inserta entre las mitades del molde, como se observa en la figura 14.7. Después, se cierra la prensa y el diagrama se expande, de modo que el caucho suave se comprime contra la cavidad del molde. Esto hace que se imprima el patrón de estrías al caucho. Al mismo tiempo, éste se calienta, tanto desde el exterior del molde y desde el interior del diafragma. Para calentar este último se emplea agua caliente o vapor en circulación. La duración de este paso de cura depende del espesor de la pared de la llanta. Una llanta de automóvil común de pasajeros se cura en alrededor de 15 minutos. Las llantas de bicicleta se curan en cuatro minutos, mientras que las llantas para equipos grandes para mover tierras requieren varias horas de cura. Una vez terminada ésta, la llanta se enfría y se quita de la prensa.

14.2.2 Otros productos de caucho

La mayoría de productos de caucho están hechos con procesos menos complejos. Las ***bandas de caucho*** se emplean mucho en transportadores y sistemas mecánicos de transmisión de potencia. Igual que con las llantas, el caucho es un material ideal para estos productos, pero la banda debe tener poca o ninguna elasticidad a fin de que funcione. En concordancia, se refuerza con fibras, por lo común poliéster o naylon. Las telas de estos polímeros por lo

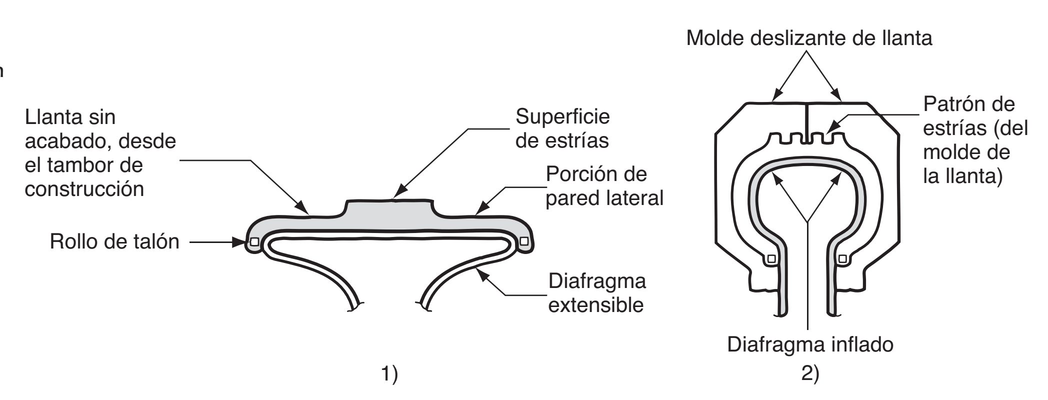


FIGURA 14.7 Moldeo de llantas (se muestra la sección transversal de una llanta): 1) se coloca la llanta sin curar sobre un diafragma extensible; 2) el molde se cierra y el diafragma se expande para forzar el caucho sin curar contra la cavidad del molde, lo que imprime el patrón de estrías al caucho; se calientan el molde y el diafragma para curar el caucho.

general se recubren en operaciones de calandrado, se ensamblan juntas para obtener el número de pliegues y espesor requeridos, y después se vulcaniza por medio de procesos continuos o de calentamiento por lotes.

Una ***manguera de caucho*** puede ser sencilla o reforzada. La manguera sencilla es un tubo extruido. El tubo de refuerzo consiste en un tubo interior, una capa de refuerzo (a veces denominada *carcasa*) y una cubierta. El tubo interno se extruye de un caucho compuesto para la sustancia particular que fluirá por él. La capa de refuerzo se aplica al tubo en forma de tela, espiral, tejida, trensada u otro método de aplicación. La capa exterior está compuesta para resistir las condiciones ambientales. Se aplica por extrusión, con el uso de rodillos o de otras técnicas.

Los componentes de ***calzado*** incluyen suelas, tacones, zapatones de goma y ciertas piezas superiores. Para fabricar componentes de calzado se usa una variedad de cauchos (sección 8.4). Las piezas moldeadas se producen por inyección, compresión y ciertas técnicas especiales de moldeo creadas por la industria del calzado; los cauchos incluyen variedades tanto sólida como espumada. En ciertos casos, para un volumen bajo de producción, se utilizan métodos manuales para cortar el caucho de un suministro sencillo.

El caucho se usa mucho en equipo y artículos deportivos, que incluyen superficies de paletas para ping pong, mangos de palos de golf, sacos de golpeo para futbol americano y pelotas deportivas de varias clases. Por ejemplo, las pelotas de tenis se fabrican en número significativo. La producción de estos artículos deportivos se hace con los procesos de formado distintos que se estudiaron en la sección 14.1.4, así como con técnicas especiales implantadas para objetos particulares.

14.2.3 Procesamiento de elastómeros termoplásticos

Un ***elastómero termoplástico*** (TPE, por sus siglas en inglés) es un polímero termoplástico que tiene las propiedades de un caucho (sección 8.4.3); también se emplea el término ***caucho termoplástico***. El TPE se procesa como los termoplásticos, pero sus aplicaciones son las de los elastómeros. Los procesos de conformación más comunes son el moldeo por inyección y la extrusión que, por lo general, son más económicos y rápidos que los procesos tradicionales que se emplean para los cauchos, que deben vulcanizarse. Los productos moldeados incluyen suelas, calzado deportivo y componentes automotrices, tales como extensiones de salpicaderas y paneles para las esquinas (pero no llantas; se ha descubierto que los TPE no son satisfactorios para esa aplicación). Los artículos extruidos incluyen recubrimiento para aislar alambres eléctricos, tubería para aplicaciones médicas, bandas transportadoras, y hojas y películas. Otras técnicas de formado de TPE incluyen el moldeo por soplado y termoformado (secciones 13.8 y 13.9); estos procesos no pueden utilizarse para cauchos vulcanizados.

14.3 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

Muchos de los lineamientos que se usan para los plásticos se aplican a los productos de caucho. Hay diferencias, por las propiedades elastoméricas del caucho. Las siguientes se compilaron, sobre todo de Bralla [4]; se aplican al caucho suave convencional, no al duro.

- ***Cantidades económicas de producción.*** Las piezas producidas con moldeo por compresión (el proceso tradicional) con frecuencia se producen en cantidades de 1000 o menos. El costo del molde es relativamente bajo en comparación con otros métodos de moldeado. El moldeo por inyección, igual que con las piezas de plástico, requiere cantidades de producción más elevadas a fin de que se justifique el molde más caro.
- ***Ahusado.*** Por lo general, no es necesario hacer un ahusado en las piezas de caucho moldeadas. La flexibilidad del material permite que se deforme para quitarlo del molde.

Los cortes poco profundos, si bien indeseables, son posibles con piezas de caucho moldeadas por la misma razón. La rigidez baja y elasticidad grande del material permite su retiro del molde.

➢ ***Agujeros.*** Son difíciles de practicar en el caucho una vez formado, debido a la flexibilidad del material. Por lo general es deseable moldearlos en el caucho durante el proceso de formado primario.

➢ ***Cuerdas de tornillo.*** Generalmente no se incorporan en piezas de caucho moldeadas; la deformación elástica del caucho hace difícil ensamblar piezas por medio de cuerdas, y una vez insertado es un problema retirar un tornillo.

REFERENCIAS

[1] Alliger, G. y Sjothun, I. J. (eds.). ***Vulcanization of Elastomers.*** Krieger Publishing Company, Nueva York, 1978.

[2] Billmeyer, Fred, W., Jr. ***Textbook of Polymer Science.*** 3a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.

[3] Blow, C. M. y Hepburn, C. ***Rubber Technology and Manufacture.*** 2a. ed., Butterworth-Heinemann, Londres, 1982.

[4] Bralla, J. G. (ed.). ***Design for Manufacturability Handbook.*** 2a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.

[5] Hofmann, W. ***Rubber Technology Handbook.*** Hanser-Gardner Publications, Cincinnati, Ohio, 1989.

[6] Morton-Jones, D. H. ***Polymer Processing.*** Chapman and Hall, Londres, U. K. 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

14.1. ¿Cómo está organizada la industria del caucho?

14.2. ¿Cómo se obtiene el caucho crudo a partir del látex que produce el árbol del caucho?

14.3. ¿Cuál es la secuencia de pasos de procesamiento que se requiere para producir bienes terminados de caucho?

14.4. ¿Cuáles son algunos de los aditivos que se combinan con el caucho durante la composición?

14.5. Mencione las cuatro categorías básicas de procesos que se utilizan para dar forma al caucho.

14.6. ¿Qué le hace la vulcanización al caucho?

14.7. Mencione las tres construcciones básicas de llantas y señale brevemente las diferencias entre ellas.

14.8. ¿Cuáles son las tres etapas básicas de la manufactura de un neumático?

14.9. ¿Cuál es el propósito de los rollos de talón de un neumático?

14.10. ¿Qué es un TPE?

14.11. Muchos de los lineamientos de diseño aplicables a los plásticos también lo son para el caucho. Sin embargo, la flexibilidad extrema de éste genera ciertas diferencias. ¿Cuáles son algunos ejemplos de éstas?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 10 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

14.1. ¿Cuál de los siguientes es el producto de caucho más importante?: *a*) calzado, *b*) bandas transportadoras, *c*) neumáticos o *d*) pelotas de tenis.

14.2. ¿Cuál de los siguientes es el nombre químico de los ingredientes obtenidos del látex del árbol del caucho?: *a*) polibutadino, *b*) poliisobutileno, *c*) poliisopreno o *d*) poliestireno.

14.3. De los siguientes aditivos del caucho, ¿cuál calificaría como el más importante?: *a*) antioxidantes, *b*) negro de humo, *c*) arcillas y otros silicatos hidratados de aluminio, *d*) plastificadores y aceites suavizantes o *e*) caucho reciclado.

14.4. ¿Cuál de los siguientes procesos de moldeado es el más importante en la producción de artículos de caucho convencional?: *a*) moldeo por compresión, *b*) moldeo

por inyección, *c*) termoformado o *d*) moldeo por transferencia.

14.5. ¿Cuál de los ingredientes que siguen no contribuyen en el proceso de vulcanización? (dos respuestas correctas): *a*) carbonato de calcio, *b*) negro de humo, *c*) ácido esteárico, *d*) azufre y *e*) óxido de zinc.

14.6. ¿Cuántos minutos se requieren para curar (vulcanizar) una llanta moderna de automóvil de pasajeros?: *a*) 5, *b*) 15, *c*) 25, *d*) 45.

14.7. ¿Cuándo se imprime el patrón de estrías en la circunferencia de la llanta?: *a*) durante el preformado, *b*) mientras se construye la carcasa, *c*) durante el moldeo o *d*) durante la cura.

14.8. ¿Cuál de los siguientes normalmente no se utiliza en el procesamiento de los elastómeros termoplásticos? (dos respuestas correctas): *a*) moldeo por soplado, *b*) moldeo por compresión, *c*) extrusión, *d*) moldeo por inyección o *e*) vulcanización.

15 PROCESOS DE FORMADO PARA MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En este capítulo se tratan los procesos de manufactura para formar productos y componentes útiles a partir de compuestos con matriz polimérica. Un ***compuesto con matriz polimérica*** (PMC, por sus siglas en inglés para polymer matrix composite) es un material compuesto que consiste en un polímero incorporado a una fase de refuerzo como fibras o polvos. La importancia tecnológica y comercial de los procesos descritos en este capítulo deriva del uso creciente de esta clase de materiales, especialmente los ***polímeros reforzados con fibra*** (FRP, por sus siglas en inglés para fiber-reinforced polymers). Popularmente, los PMC se asocian en general a los polímeros reforzados con fibra. Los compuestos de FRP pueden diseñarse con relaciones muy altas de resistencia y rigidez a peso. Estas características los hacen atractivos para aviones, automóviles, camiones, barcos y equipo deportivo.

Algunos de los procesos de conformación descritos en este capítulo son lentos e intensivos en mano de obra. En general, las técnicas para formar compuestos son menos eficientes que los procesos de manufactura para otros materiales. Hay dos razones para esto: 1) los materiales compuestos son más complejos que otros materiales porque constan de dos o más fases, y en el caso de los plásticos reforzados con fibra, hay necesidad de orientar la fase de refuerzo; y 2) las tecnologías de procesamiento para los compuestos no han sido mejoradas y refinadas desde hace algunos años como los procesamientos para otros materiales.

La variedad de métodos de formado para polímeros reforzados con fibra es muchas veces abrumadora para estudiantes en su primera lectura. Un itinerario para el lector que entra a este nuevo territorio es el siguiente: los procesos de formación de compuestos de FRP pueden dividirse en cinco categorías, como se muestra en la figura 15.1: 1) procesos en molde abierto, 2) procesos en molde cerrado, 3) bobinado de filamentos, 4) procesos de pultrusión y 5) otros. ***Los procesos en molde abierto*** incluyen algunos de los procedimientos originales en los que se depositan manualmente resinas y fibras sobre una forma. ***Los procesos en molde cerrado*** son los mismos del moldeo de plásticos, el lector puede reconocer los nombres: moldeo por compresión, moldeo por transferencia, moldeo por inyección, aunque los nombres pueden cambiar algunas veces y se pueden hacer modificaciones para los PMC. En el ***bobinado de filamentos*** se enrollan filamentos continuos que han sido sumergidos en resina líquida alrededor de un mandril giratorio; cuando la resina es el agente de curado, se genera una forma cilíndrica rígida y hueca. La

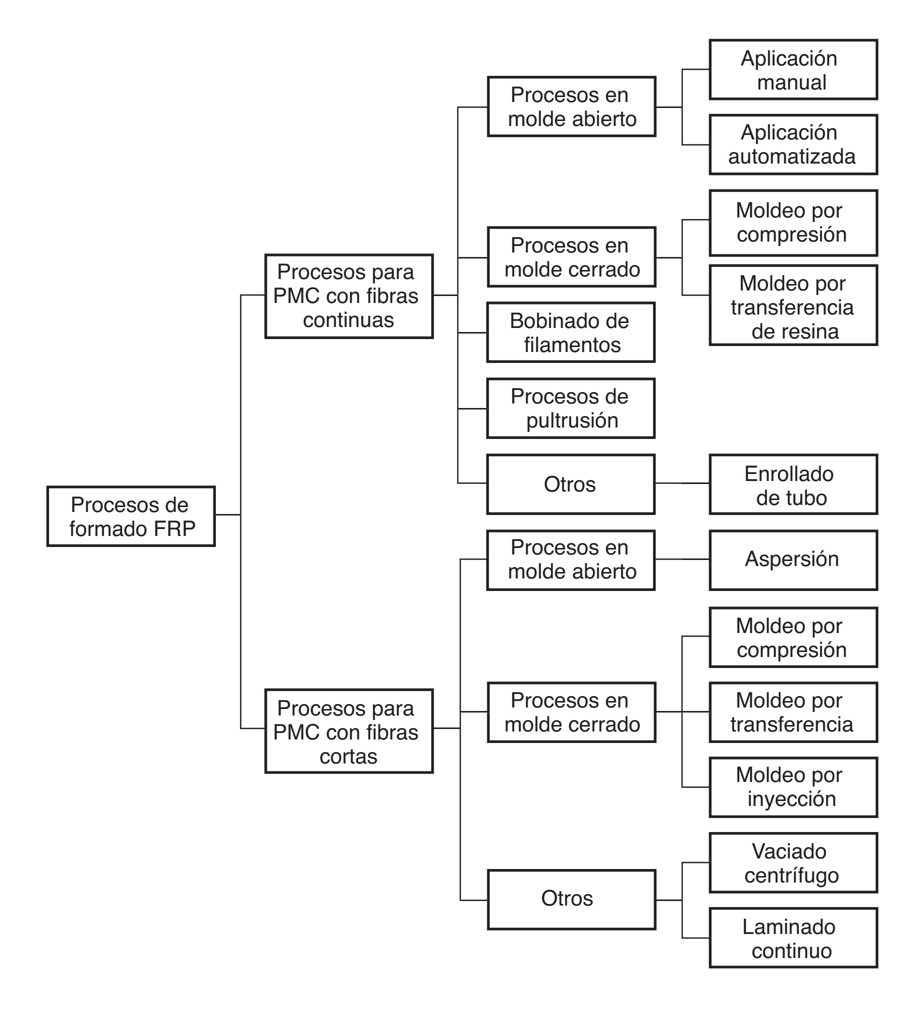


FIGURA 15.1 Clasificación de los procesos de manufactura para compuestos de polímeros reforzados con fibras.

pultrusión es un proceso de formado para producir secciones largas y rectilíneas de sección transversal constante; es similar a la extrusión, solamente que adaptada para incluir refuerzos de fibra continua. La categoría de "otros" incluye varias operaciones que no encajan en las categorías previas.

Algunos de estos procesos se usan para formar compuestos con fibras continuas, mientras que otros se usan para PMC de fibras cortas. La figura 15.1 ofrece un resumen de los procesos en cada división. El estudio inicia explorando cómo se producen las fases individuales en un PMC y cómo se combinan estas fases con las materias primas para formado. Para obtener una visión completa de los procesos PMC, se recomienda que el lector revise el video titulado Materiales compuestos y manufactura.

15.1 MATERIAS PRIMAS PARA MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA (PMC)

En un PMC, las materias primas son un polímero y una fase de refuerzo. Se procesan separadamente antes de convertirse en fases del compuesto. En esta sección consideraremos cómo se producen estos materiales, antes de combinarse para formar la parte compuesta.

15.1.1 Matriz polimérica

En los PMC se usan como matrices los tres tipos de polímeros básicos: termoplásticos, termofijos (o termoestables) y elastómeros. Los polímeros termofijos (en inglés, TS) son los materiales de las matrices más comunes. Los principales polímeros TS son los fenólicos, los poliésteres insaturados y los epóxicos. Los fenólicos se asocian con el uso de las fases de refuerzo particulado, en tanto que los poliésteres y los epóxicos se asocian más estrechamente con los FRP. Los polímeros termoplásticos (TP) se usan también en los PMC, y de hecho los compuestos de moldeo son materiales compuestos que incluyen rellenos o agentes de refuerzo. La mayoría de los elastómeros son materiales compuestos debido a que casi todos los cauchos se refuerzan con negro de humo. Los procesos de formación para caucho se cubren en el capítulo 14. Este capítulo se limita al procesamiento de PMC cuya matriz es un polímero termofijo o termoplástico. Muchos de los procesos de formado de polímeros revisados en el capítulo 13 se aplican a los compuestos en matriz polimérica. Sin embargo, la combinación del polímero con los agentes de refuerzo complica algunas veces las operaciones.

15.1.2 Agentes reforzadores

La fase de refuerzo puede tener varias formas (fibras, partículas, hojuelas) y diversos materiales (cerámicos, metales, otros polímeros, o elementos como carbono o boro). El papel de la fase de refuerzo y algunas de sus características técnicas se analizaron en la sección 9.1.2.

Fibras Los materiales más comunes de fibra utilizados en los FRP son el vidrio, el carbono y el polímero Kevlar. Las fibras de estos materiales se fabrican mediante varias técnicas, algunas de las cuales se estudian en otros capítulos. Las fibras de vidrio se fabrican por el

estiramiento a través de pequeños orificios (sección 12.2.3). En el caso del carbono, se lleva a cabo una serie de tratamientos térmicos para transformar el filamento precursor, que contiene un compuesto de carbono, en una forma más pura de ese elemento. El precursor puede estar fabricado de varias sustancias dentro de las que se incluyen el poliacrilonitrilo (PAN), pez (una resina negra de carbón formada en la destilación del alquitrán de carbón, alquitrán de madera, petróleo crudo, etc.) o rayón (celulosa). Las fibras de Kevlar se fabrican por medio de extrusión combinada con estirado a través de pequeños orificios en una hilera (sección 13.4).

En los filamentos continuos, las fibras se combinan con la matriz polimérica en varias formas, dependiendo de las propiedades que se desean en el material y de los métodos de procesamiento utilizados para formar el compuesto. En algunos procesos los filamentos son continuos, mientras que en otros se trozan en fibras cortas. En la forma continua, se dispone de filamentos individuales en forma de mechas. Una ***mecha*** es una colección no torcida de fibras continuas (paralelas); es una forma conveniente para manejar y procesar. Las mechas típicas contienen de 12 a 120 fibras individuales. Por el contrario, un ***hilo*** es una colección torcida de filamentos. Las mechas continuas se usan en varios procesos de PMC, incluidos el bobinado de filamentos y la pultrusión.

La forma más familiar de fibra continua es una ***tela*** o trama tejida de hilos. El ***tejido de mechas***, muy similar a una tela, pero distinguido en este contexto, consiste en filamentos no torcidos en lugar de hilos. Los tejidos de mechas se pueden producir con números desiguales de fibras en dos direcciones, de manera que su resistencia sea más grande en una dirección que en la otra. Dicho tejido unidireccional de mechas se prefiere muchas veces para los compuestos laminados de FRP.

Las fibras pueden prepararse también en forma de ***esteras***, un fieltro que consiste en fibras cortas orientadas aleatoriamente y aglomeradas holgadamente con un aglutinante, algunas veces en una tela portadora. Se dispone comercialmente de las esteras como mantas de varios pesos, espesores y anchos. Las esteras se pueden cortar y conformar para usarse como ***preformas*** en algunos procesos en molde cerrado. Durante el moldeado, las resinas impregnan la preforma y luego se las curan, produciendo así una parte moldeada con refuerzo de fibra.

Partículas y hojuelas Las partículas y las hojuelas caen realmente en una sola clase. Las hojuelas son partículas cuyo ancho y largo son mayores que su espesor. Se analizarán éstos y otros aspectos sobre la caracterización de los polvos de ingeniería en la sección 16.1. Los métodos de producción de polvos metálicos se estudiarán en la sección 16.2 y las técnicas para producir polvos cerámicos, en la sección 17.1.1.

15.1.3 Combinación de la matriz y el refuerzo

La incorporación del agente de refuerzo a la matriz polimérica ocurre durante el proceso de conformado o antes. En el primer caso, los materiales iniciales (materia prima) llegan a la operación de fabricación en entidades separadas y se combinan dentro del compuesto durante el formado. Ejemplos de este caso son el bobinado de filamentos y la pultrusión. El refuerzo inicial en este proceso consiste en fibras continuas. En el segundo caso, los dos materiales componentes se combinan en una forma preliminar que se usa convenientemente en el proceso de formado. Casi todos los termoplásticos y termofijos (termoestables) que se usan en los procesos de conformado de plástico son, de hecho, polímeros combinados con rellenos (sección 8.1.5). Los rellenos o rellenadores son fibras cortas o particulados (incluidas hojuelas).

Las formas iniciales que se usan en los procesos de formado, diseñados específicamente para compuestos de FRP, son los de mayor interés en este capítulo. Estas formas iniciales son compuestos prefabricados que llegan listos para usarse en los procesos de formado, son compuestos de moldeo y productos preimpregnados.

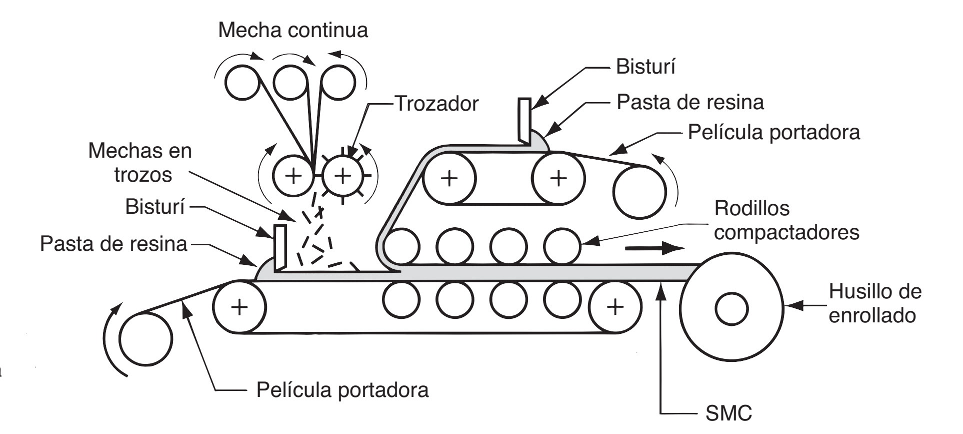


FIGURA 15.2 Proceso para producir el compuesto para el moldeo de lámina.

Compuestos de moldeo Los compuestos para moldeo son similares a los que se usan en el moldeo de plásticos. Se diseñan para usarse en operaciones de moldeo, de tal manera que puedan fluir, al menos hasta cierto grado. La mayoría de los compuestos de moldeo para el procesado de los compuestos son polímeros termofijos. Por consiguiente, no han sido curados; el curado se hace durante o después del formado final. Los compuestos de moldeo para compuestos de FRP consisten en matrices de resina con fibras cortas dispersadas al azar, y vienen en varias formas.

Los compuestos para el moldeo de láminas (SMC, por sus siglas en inglés) son una combinación de resina de polímero termofijo, rellenos, fibras de vidrio cortadas y otros aditivos (orientadas al azar), que se laminan a un espesor típico de 6.5 mm (0.250 in). La resina más común es el poliéster insaturado. Los rellenos son generalmente polvos minerales como talco, sílice y piedra caliza; y las fibras de vidrio tienen una longitud típica de 12 a 75 mm (0.5 a 3 in); esto representa cerca de 30% del SMC en volumen. Es muy conveniente manejar y cortar al tamaño adecuado los SMC como cargas de moldeo. Los compuestos de moldeo para láminas se producen y surten generalmente entre cargas delgadas de polietileno para limitar la evaporación de los ingredientes volátiles de la resina termofija. El recubrimiento protector mejora también el acabado de la superficie y por consiguiente de las piezas moldeadas. En la figura 15.2 se describe el proceso para la fabricación de los SMC continuos.

Los compuestos para moldeo volumétrico (BMC, por sus siglas en inglés) consisten en ingredientes similares a los de los SMC, pero el polímero compuesto se hace en forma de barra en lugar de lámina. Las fibras en los BMC son más cortas, típicamente de 2 a 12 mm (0.1 a 0.15 in), debido a la mayor fluidez requerida en las operaciones de moldeo para las cuales se diseñan estos materiales. El diámetro de las barras es generalmente de 25 a 50 mm (1 a 2 in). Los procesos para producir BMC son similares a los de SMC, excepto que se usa la extrusión para obtener la forma final de la barra. Los BMC se conocen también como ***compuestos para moldeo en pasta*** (DCM, por sus siglas en inglés) debido a su consistencia pastosa. Otros compuestos para moldeo de FRP son el ***compuesto para moldeo grueso*** (TMC, por sus siglas en inglés), que es similar al SMC pero más grueso, alcanza hasta 50 mm (2 in); y los ***compuestos para moldeo paletizado,*** que son básicamente compuestos para el moldeo convencional de plásticos que contienen fibras cortas.

Productos preimpregnados Otra forma prefabricada para operaciones de formado de FRP son los ***productos preimpregnados***, que consisten en fibras impregnadas con resinas termofijas parcialmente curadas para facilitar el proceso de formado. El curado completo debe realizarse durante o después del formado (o ambas). Los productos preimpregnados se disponen en forma de cintas, láminas o telas aplicadas transversalmente. La ventaja de los productos preimpregnados es que se fabrican con filamentos continuos más que con fibras recortadas aleatoriamente, incrementando así la resistencia y el módulo del producto final. Las cintas y láminas con productos preimpregnados se asocian con compuestos avanzados (reforzados con boro, carbono-grafito y Kevlar), así como con fibras de vidrio.

15.2 PROCESOS CON MOLDE ABIERTO

La característica distintiva de esta familia de procesos de formado de FRP es el uso de una sola superficie de molde positivo o negativo (véase la figura 15.3) para producir estructuras laminadas de FRP. El proceso en molde abierto también se conoce con otros nombres, como ***laminación por contacto*** y ***moldeo por contacto***. Los materiales iniciales (resinas, fibras, esteras y mechas tejidas) se aplican al molde en capas para constituir el espesor deseado. Después continúa el curado y el retiro de la pieza. Las resinas comunes para estos procesos son poliésteres insaturados y epóxicos, usando fibra de vidrio como refuerzo. Las piezas moldeadas generalmente son grandes (por ejemplo, cascos para lanchas). La ventaja de usar moldes abiertos es que el costo del molde es mucho menor que si se usaran moldes acoplados. La desventaja es que solamente la superficie de la pieza en contacto con el molde es una superficie acabada; el otro lado queda áspero. El molde en sí debe ser muy liso para un mejor acabado de la superficie de la pieza.

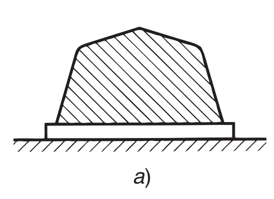
Hay varios procesos importantes de molde abierto para FRP. Las diferencias están en los métodos para aplicar las capas al molde, las técnicas de curado alternativo y otras modificaciones. En esta sección describimos la familia de procesos de molde abierto para dar forma a los plásticos reforzados con fibra: 1) aplicado manual, 2) aspersión, 3) máquinas de aplicación automatizada con cinta y 4) moldeo con bolsa. El aplicado manual es el proceso básico y los otros son modificaciones y refinamientos.

15.2.1 Aplicado manual

El aplicado manual es el método en molde abierto más antiguo para laminados de FRP; se remonta a la década de 1940, cuando se usó por primera vez para fabricar cascos de lanchas. Es también el método que tiene mayor intensidad de mano de obra. Como su nombre indica, el ***aplicado manual*** es un método en el cual se aplican manualmente capas sucesivas de resina y refuerzo en un molde abierto para construir la estructura compuesta del FRP laminado. El procedimiento básico consiste en cinco pasos, como se ilustra en la figura 15.4. La pieza terminada se debe recortar generalmente con una sierra mecánica para dimensionar los bordes exteriores. En general se requieren estos mismos cinco pasos en todos los procesos de molde abierto; las diferencias entre los diversos métodos ocurren en los pasos 3 y 4, como se verá a continuación.

Cada capa de refuerzo de fibra está seca en el paso 3, cuando se coloca sobre el molde. Se vacía entonces la resina líquida (no curada), o se aplica con brocha o por aspersión. El impregnado de la estera o tela de fibra se hace con rodillos de mano. A esta operación se le conoce como ***aplicación húmeda***. Un procedimiento alternativo se realiza mediante el uso de ***productos preimpregnados*** donde primero se preparan las capas impregnadas de refuerzo de fibra y luego se colocan en la superficie del molde. Las ventajas que se atribuyen a los productos preimpregnados son un control más estrecho sobre la mezcla de fibra y resina, y métodos más eficientes para agregar las capas [10].

Los moldes para laminar por contacto en molde abierto se pueden hacer de yeso, metal, plásticos reforzados con fibra de vidrio u otros materiales. La selección del material depende de la economía, la calidad de la superficie y otros factores técnicos. Para la fabricación de prototipos donde se produce solamente una pieza se usa moldes de yeso. Para cantidades medias, los moldes se pueden hacer de plástico reforzado con fibra de vidrio. La alta



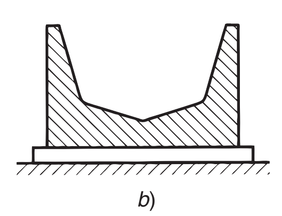


FIGURA 15.3 Tipos de molde abierto: *a*) positivo y *b*) negativo.

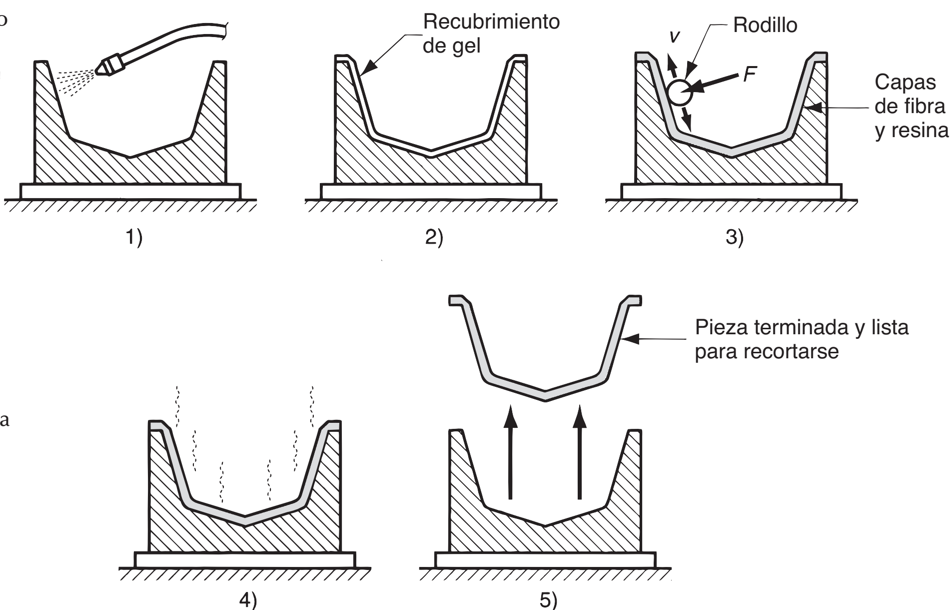


FIGURA 15.4 Procedimiento de aplicación manual: 1) se limpia el molde y se trata con un agente antiadherente; 2) se aplica un recubrimiento delgado de gel (resina, posiblemente pigmentada con color) que se convertirá en la superficie externa de la pieza; 3) después que el recubrimiento de gel ha cuajado parcialmente, se aplican capas sucesivas de fibra y resina en la fibra en forma de estera o tela; a cada capa se le pasa un rodillo para impregnar completamente la fibra con la resina y remover las burbujas de aire; 4) se cura la pieza y 5) se retira del molde la pieza completamente endurecida.

producción requiere generalmente moldes metálicos. Se usa algunas veces el aluminio, el acero y el níquel con las superficies de la cara del molde endurecidas, para resistir el desgaste. Una ventaja del metal, además de su durabilidad, es su alta conductividad térmica que permite instrumentar sistemas de curado por calor, o simplemente disipar el calor de la laminación mientras ésta se cura a temperatura ambiente.

La aplicación manual se presta generalmente para productos de gran tamaño fabricados en baja cantidad. Aparte de los cascos de lanchas, este procedimiento se usa para producir albercas, tanques grandes de almacenamiento, escenarios de utilería, cúpulas de antena de radar y otras formas laminadas. También se hacen piezas automotrices, pero el método no es económico para la alta producción. Las piezas moldeadas más grandes que se han hecho con este proceso fueron unos cascos de 85 m (280 ft) de largo para la British Royal Navy[1].

15.2.2 Aplicado por aspersión

La aspersión es un intento de mecanizar la aplicación de capas de resina y fibra, así como para reducir el tiempo de la operación. Es una alternativa para el paso 3 en el procedimiento manual. En el ***método por aspersión*** la resina líquida y las fibras cortadas se rocían sobre un molde abierto para construir capas sucesivas de FRP, como se muestra en la figura 15.5.

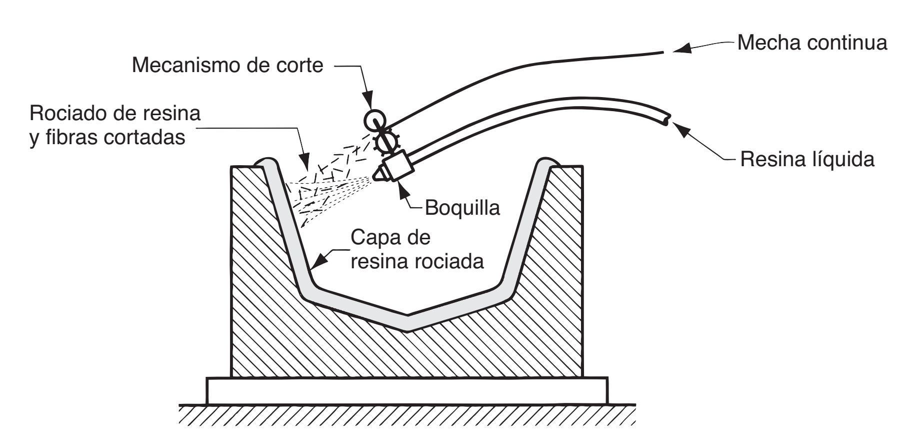


FIGURA 15.5 Método de aplicación por aspersión.

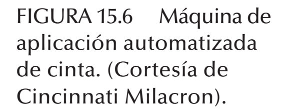
La pistola aspersora está equipada con un mecanismo de corte alimentado con una mecha de filamentos que corta en fibras cuyas longitudes van de 25 a 75 mm (1 a 3 in), los cuales se incorporan a la corriente de resina a la salida de la boquilla. La acción mezcladora genera una orientación aleatoria de las fibras en la capa, a diferencia de la aplicación manual en la cual los filamentos pueden orientarse como se quiera. Otra diferencia es que el contenido de fibra en la aspersión se limita a cerca de 35% (comparado con un máximo de cerca de 65% en el aplicado manual). Ésta es una deficiencia de los procesos de aspersión y mezclado.

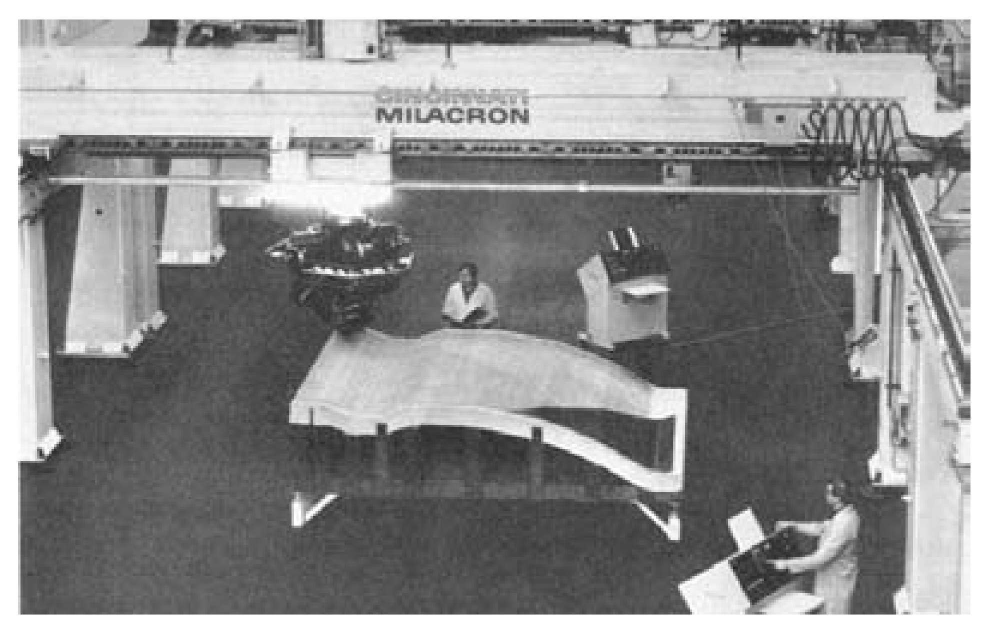
La aspersión se puede realizar manualmente usando una pistola portátil o mediante una máquina automatizada, en la cual se programa y controla la ruta de la pistola aspersora por una computadora. El procedimiento automatizado es ventajoso para la eficiencia del trabajo y la protección ambiental. Las máquinas de ruta controlada pueden operar en áreas selladas sin la presencia de seres humanos, ya que algunas de las emisiones volátiles de las resinas líquidas son peligrosas. Sin embargo, generalmente se requiere el impregnado con rodillos para cada capa, como en el procedimiento manual.

Los productos hechos con el método de aspersión incluyen cascos para lanchas, tinas de baño, casetas para ducha, piezas para carrocerías de automóviles y camiones, componentes de vehículos recreativos, muebles, paneles estructurales grandes y contenedores. Las pantallas para cine y escenarios de utilería se hacen algunas veces con este método. Debido a que tienen fibras cortas orientadas aleatoriamente, los productos hechos por aspersión no son tan fuertes como los hechos por aplicación manual de capas cuyas fibras son continuas y dirigidas.

15.2.3 Máquinas de aplicación automatizada con cinta

Éste es otro intento de automatizar y acelerar el paso 3 en el procedimiento manual. Las máquinas de aplicación automatizada con cinta operan con un aplicador de cinta de productos preimpregnados sobre un molde abierto siguiendo una ruta programada. La máquina típica consiste en un pórtico transversal móvil al cual se le ha acoplado una cabeza surtidora como se muestra en la figura 15.6. El pórtico permite que la cabeza recorra la superficie del molde en las direcciones x-y-z para tomar posiciones y seguir una trayectoria continua definida. La cabeza tiene varios ejes de rotación, más un dispositivo de corte para cortar la cinta al final de cada ruta. El ancho de la cinta de productos preimpregnados es comúnmente de 75 mm (3 in), aunque se han reportado anchos de 300 mm (12 in), [9]; el espesor es cercano a 0.13 mm (0.005 in). Los rollos colocados en la cabeza surten la cinta que se va adhiriendo a la superficie a lo largo de la ruta definida. Cada capa se forma por una serie de recorridos hacia adelante y hacia atrás, a través de la superficie del molde hasta completar la capa de filas paralelas.


FIGURA 15.6 Máquina de aplicación automatizada de cinta. (Cortesía de Cincinnati Milacron).



Gran parte del trabajo para perfeccionar las máquinas de aplicación automatizada de cinta la ha realizado la industria de la aviación, en su afán de ahorrar costos de mano de obra y lograr al mismo tiempo la más alta uniformidad y calidad posibles en la manufactura de sus componentes. La desventaja de ésta y de otras máquinas controladas numéricamente por computadora es que necesitan ser programadas, y la programación toma tiempo.

15.2.4 Curado

Se requiere el curado (paso 4) para todas las resinas termofijas que se usan en los compuestos laminados de FRP. En el curado tiene lugar el encadenamiento transversal del polímero, que pasa de una condición líquida o altamente plástica a un producto endurecido. Hay tres parámetros principales en el proceso de curado: tiempo, temperatura y presión.

En los procedimientos de aplicación manual y aspersión donde se usan resinas TS, el curado ocurre normalmente a temperatura ambiente. Las piezas moldeadas hechas por estos procesos generalmente son grandes (por ejemplo, cascos de barcos) y el calentamiento suele dificultarse. En algunos casos se requieren días antes de que se complete el curado a temperatura ambiente para retirar la pieza. Cuando es posible, se puede suministrar calor para acelerar la reacción de curado.

El calentamiento se realiza de varias maneras. El curado por horno suministra calor a temperaturas estrechamente controladas; algunos hornos cuentan con equipos para practicar el vacío parcial. El calentamiento con rayos infrarrojos se puede aplicar donde es impráctico o inconveniente poner la pieza moldeada en un horno.

El curado en un autoclave provee control sobre la temperatura y la presión. Un ***autoclave*** es una cámara cerrada que está diseñada para aplicar calor y presión a niveles controlados. En el procesamiento de compuestos de FRP, usualmente es un cilindro grande horizontal con puertas en ambos extremos. Algunas veces se usa el término ***moldeo en autoclave*** para referirse al curado de un laminado con productos preimpregnados en autoclave. Este procedimiento se usa extensamente en la industria aeroespacial para producir componentes avanzados de muy alta calidad.

15.3 PROCESOS CON MOLDE CERRADO

Estas operaciones de moldeo se realizan en moldes que consisten en dos secciones que se abren y cierran durante cada ciclo de moldeo. El nombre ***moldeo en troqueles acoplados*** se usa para algunos de estos procesos. Se podría pensar que el costo de un molde cerrado es el doble de un molde abierto; sin embargo, el costo de las herramientas es aún más grande debido al equipo más complejo que se requiere en este proceso. A pesar de su alto costo, las ventajas del molde cerrado son: 1) buen acabado en todas las superficies de la pieza, 2) velocidades más altas de producción, 3) mayor control sobre las tolerancias y 4) posibilidad de formas tridimensionales más complejas.

Los procesos de molde cerrado se dividen en tres clases con base en sus equivalentes en el moldeo de plásticos convencional, a pesar de que la terminología puede diferir cuando se moldean compuestos en matriz polimérica: 1) moldeo por compresión, 2) moldeo por transferencia y 3) moldeo por inyección.

15.3.1 Procesos de moldeo por compresión para PMC

En el moldeo por compresión de los compuestos de moldeo convencionales (sección 13.7.1) se coloca una carga en la sección inferior del molde y las dos secciones se cierran bajo presión, para que la carga tome la forma de la cavidad. Las dos mitades del molde se calientan para efectuar el curado del polímero termofijo. Cuando la pieza moldeada se ha

curado lo suficiente, se abre el molde y se retira la pieza. Hay varios procesos de formado para PMC basados en el moldeo por compresión; la forma de los materiales iniciales es la diferencia principal. Los factores críticos durante el moldeo por compresión para compuestos de FRP son el flujo de la resina, las fibras y los otros ingredientes.

Moldeo de SMC, TMC y BMC Varios de los compuestos para moldeo de FRP, como son los compuestos para moldeo de láminas (SMC), los compuestos para moldeo volumétrico (BMC) y los compuestos para moldeo grueso (TMC), pueden cortarse al tamaño apropiado y usarse como carga inicial en moldeo por compresión. Frecuentemente se requiere refrigeración para almacenar estos materiales antes de su procesamiento. Los nombres de los procesos de moldeo se basan en el compuesto de moldeo inicial (es decir, el ***moldeo de SMC*** se refiere a una operación de moldeo donde la carga inicial es un compuesto de moldeo en lámina precortada, el ***moldeo BMC*** usa como carga un BMC cortado al tamaño y así sucesivamente).

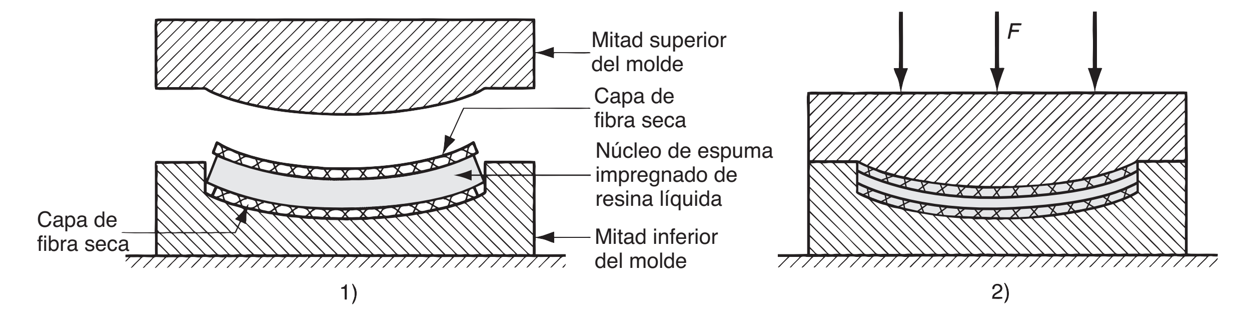
Moldeo preformado Otra forma de moldeo por compresión, llamada ***moldeo preformado*** [10], implica la colocación de una estera precortada en la parte inferior de la sección del molde junto con una carga de resina de polímero (por ejemplo, pelets o lámina). Los materiales se presionan entre las mitades calientes del molde, ocasionando que la resina fluya e impregne la fibra de la estera para producir un moldeado reforzado con fibras. Las variantes del proceso pueden usar polímeros termoplásticos o termofijos.

Moldeo con depósito elástico La carga inicial en el moldeo con depósito elástico (ERM) es un sándwich que consiste en un centro de espuma de polímero entre dos capas de fibra seca. El núcleo de espuma es comúnmente un poliuretano de celda abierta impregnada con resina líquida como un epóxico o poliéster, y las capas de fibras seca pueden ser tela, mecha tejida u otra forma de material fibroso. Como se muestra en la figura 15.7, el sándwich se coloca en la sección inferior del molde y se prensa a presión moderada, alrededor de 0.7 MPa (100 lb/in^2). Al comprimirse el núcleo, éste suelta la resina para mojar la superficie seca de las capas. El curado produce una parte de peso ligero que consiste en un núcleo de baja densidad y revestimientos delgados de FRP.

15.3.2 Procesos de moldeo por transferencia para PMC

En el moldeo convencional por transferencia (sección 13.7.2), se coloca una carga de resina termofija en un depósito o cámara, se calienta y se presiona por medio de un pisón dentro de una o más cavidades del molde. El molde se calienta para curar la resina. El proceso deriva su nombre de la transferencia del polímero fluido desde el depósito al molde. Se puede usar para moldear resinas TS cuyos rellenos incluyen fibras cortas para producir una pieza compuesta de FRP. Otra forma de moldeo por transferencia para PMC se llama ***moldeo por transferencia de resina*** (RTM, por sus siglas en inglés) [3], [10]; se refiere a un

FIGURA 15.7 Moldeo con depósito elástico: 1) se coloca espuma en el molde entre dos capas de fibra, 2) se cierra el molde, liberando la resina de la espuma hacia las capas de fibra.



proceso en molde cerrado en el cual se coloca una estera preformada en la parte inferior del molde, el molde se cierra y la resina termofija (por ejemplo, una resina de poliéster) se transfiere dentro de la cavidad a presión moderada para impregnar el preformado. Como causa de confusiones, algunas veces al RTM se le conoce como ***moldeo por inyección de resina*** [3], [11]; (no obstante, la distinción entre moldeo por transferencia y moldeo por inyección de cualquier manera es confusa, como ya el lector puede haberlo notado en el capítulo 13). El RTM ha sido utilizado para producir piezas como tinas de baño, cascarones de albercas, bancos, sillas y cascos para pequeños botes.

Se han creado varias mejoras al proceso básico de RTM [4]. Una de ellas, llamada ***RTM avanzado***, usa polímeros de alta resistencia, como resinas epóxicas y refuerzos de fibra continua, en lugar de esteras. Las aplicaciones incluyen componentes aeroespaciales, aletas de proyectiles y esquís para nieve. Dos procesos adicionales son el moldeo por transferencia de resina con expansión térmica y la inyección de resinas termofijas reforzadas al último. El ***moldeo por transferencia de resina con expansión térmica*** (TERTM, por sus siglas en inglés) es un proceso patentado por TERMT, Inc., que consiste en los siguientes pasos [4]: 1) se forma un preformado con espuma rígida de polímero (por ejemplo, poliuretano); 2) el preformado se envuelve en un esfuerzo de tela y se coloca en un molde cerrado; 3) una resina termofija (epoxi, por ejemplo) se inyecta en el molde para impregnar la tela y rodear la espuma y 4) el molde se calienta para expandir la espuma, llenar la cavidad del molde y curar la resina [4]. La ***inyección de resina termofija reforzada al último*** (URTRI, por sus siglas en inglés) es similar al proceso de TERTM, excepto que el núcleo de espuma inicial es un epóxico vaciado incorporado con esferas en miniatura de vidrio hueco.

15.3.3 Procesos de moldeo por inyección para PMC

El moldeo por inyección es notable por el bajo costo de producción de las piezas de plástico en cantidades grandes. Aunque se asocia más cercanamente con los termoplásticos, el proceso puede también adaptarse a los termofijos (sección 13.6.6).

Moldeo por inyección convencional En el proceso de formado de PMC, se usa el moldeo por inyección para ambos tipos de FRP, los TP (termoplásticos) y los TS (termofijos). Prácticamente todos los polímeros termoplásticos pueden reforzarse con fibras. Se debe usar fibras cortadas; si se usaran fibras continuas, éstas podrían de cualquier manera reducir su longitud por la acción del tornillo en el cilindro. Durante la inyección de la cámara a la cavidad del molde, las fibras tienden a quedar alineadas al pasar a través de la boquilla. Los diseñadores pueden algunas veces explotar esta característica optimizando las propiedades direccionales mediente el diseño de las piezas, la localización de las puertas y la orientación de la cavidad respecto a la puerta [7].

Si bien los compuestos de moldeo TP se calientan y luego se inyectan en un molde frío, los polímeros TS se inyectan en un molde caliente para curarse. El control del proceso con los termofijos es complicado debido al riesgo del encadenamiento transversal prematuro en la cámara de inyección. Sujeto al mismo riesgo, el moldeo por inyección puede aplicarse a plásticos TS reforzados con fibra en forma de compuestos para moldeo peletizado y en pasta.

Moldeo por inyección con reacción reforzada Algunos termofijos se curan por reacción química en lugar de calor; estas resinas se pueden moldear por inyección con reacción (RIM, por sus siglas en inglés) (sección 13.6.6). En el RIM se mezclan los dos ingredientes reactivos y se inyectan inmediatamente dentro de la cavidad de un molde donde se curan y ocurre rápidamente la solidificación de los componentes. Un proceso estrechamente relacionado incluye en la mezcla fibras de refuerzo, típicamente el vidrio. El proceso se llama en este caso, ***moldeo por inyección con reacción reforzada*** (RRIM, por sus siglas en inglés). Sus ventajas son similares a las del RIM, con el beneficio adicional del refuerzo con fibra. El RRIM se usa extensamente en aplicaciones en parachoques de carrocerías de autos y cabinas de camiones, defensas y otras partes de la carrocería.

15.4 BOBINADO DE FILAMENTOS

El ***bobinado de filamentos*** es un proceso en el cual se enrollan fibras continuas impregnadas con resina alrededor de un husillo giratorio, que tiene la forma interna del artículo de FRP que se quiere producir. La resina se cura después y el husillo se retira. Se producen componentes huecos de simetría axial (usualmente circular en sección transversal), así como formas irregulares. La forma más común del proceso se describe en la figura 15.8. Una banda de mecha de fibras se pasa a través de un baño de resina inmediatamente antes de ser enredada en forma helicoidal sobre un husillo cilíndrico. Continuando el patrón de bobinado se completa finalmente una capa superficial sobre el husillo de un filamento grueso. La operación se repite para formar capas adicionales, cada una de éstas con un patrón entrecruzado respecto a la anterior, hasta obtener el espesor adecuado.

Hay varios métodos para impregnar las fibras con resina: 1) ***bobinado húmedo***, en el cual el filamento pasa a través de la resina líquida solamente antes del bobinado, como en la figura; 2) ***bobinado con productos preimpregnados*** (también llamado ***bobinado seco***), en el cual los filamentos preimpregnados con resina parcialmente curada se enrollan alrededor de un husillo calentado; y 3) ***postimpregnación***, en el cual los filamentos se enrollan en el husillo y luego se impregnan con resina por medio de brocha o alguna otra técnica.

Se usan dos patrones básicos de bobinado del filamento: *a*) helicoidal y *b*) polar (figura 15.9). En el ***bobinado helicoidal***, la banda de filamentos se aplica en una forma espiral alrededor del husillo con un ángulo de hélice. Si la banda se bobina con un ángulo de hélice que se aproxima a los 90º, y el avance del bobinado es un ancho de banda por revolución, se denomina ***bobinado de aro***, ya que los filamentos forman aros casi circulares alrededor del husillo; es un caso especial de bobinado helicoidal. En el ***bobinado polar***, el filamento se enrolla alrededor del eje mayor del husillo, como en la figura 15.9b; después de cada revolución longitudinal, el husillo se corre (gira parcialmente) en un ancho de banda de manera que se va creando gradualmente una forma hueca. Los patrones polares y de aro se pueden combinar en bobinados sucesivos del husillo para producir capas adyacentes con direcciones del filamento aproximadamente perpendiculares; a esto se le llama ***bobinado biaxial*** [1].

Las máquinas de bobinado de filamentos tienen capacidades de movimiento similares a las de un torno corriente (sección 22.1.3). La máquina típica tiene un motor que acciona el husillo y un mecanismo de alimentación de potencia que mueve el carro. El movimiento relativo entre el husillo y el carro se controla para generar un patrón dado de bobinado.

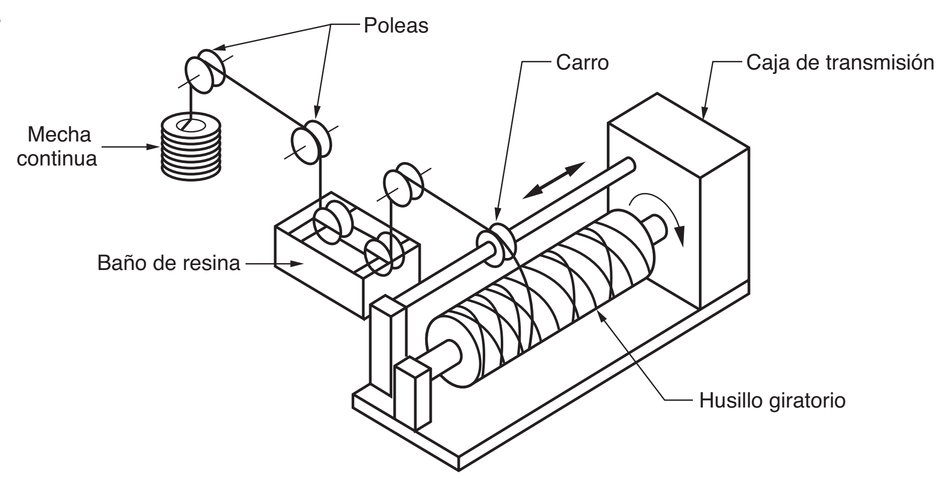


FIGURA 15.8 Bobinado de filamentos

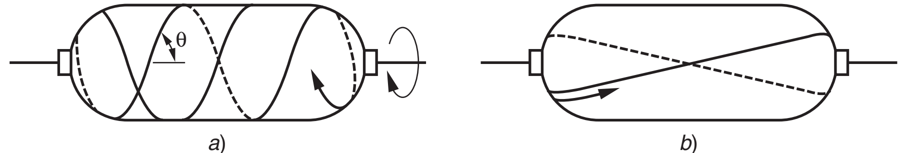


FIGURA 15.9 Dos patrones básicos de bobinado de filamentos. *a*) helicoidal y *b*) polar.

En un bobinado helicoidal, la relación entre el ángulo de la hélice y los parámetros de la máquina se pueden expresar como sigue:

$$\tan\theta = \frac{v_c}{\pi DN}$$

donde θ = ángulo de la hélice en el bobinado sobre el husillo, como se muestra en la figura 15.9a; v_c = velocidad a la cual corre el carro en la dirección axial, m/s (in/s); D = diámetro del husillo, m (in); y N = velocidad rotacional, 1/s (rev/s).

Se disponen de varios niveles de sofisticación de control en las máquinas de bobinado de filamentos. Los dos tipos predominantes son: 1) ***control mecánico***, que opera por medio del engranaje directo entre la transmisión del husillo y del carro; este tipo es el control más simple y menos costoso; y 2) ***control numérico computarizado*** (CNC), en el cual la rotación del husillo y la velocidad del carro se controlan independientemente para permitir mayores ajuste y flexibilidad de los movimientos relativos. El CNC es especialmente útil en bobinados helicoidales de formas contorneadas, como se muestra en la figura 15.10. La relación v_c/DN, como se indica en la ecuación (15.1), debe permanecer fija para mantener un ángulo constante de hélice. Entonces, ya sea v_c o N, deben ajustarse en línea para compensar los cambios en D.

El ***husillo*** es la herramienta especial que determina la geometría de la pieza bobinada con filamento. Éste debe ser capaz de plegarse después del bobinado y del curado de la pieza para poder retirarla. Son posibles varios diseños del husillo, incluido husillos inflables, husillos metálicos plegables y husillos hechos de yeso o de sales solubles.

Las aplicaciones del bobinado de filamentos se clasifican frecuentemente como aeroespaciales o comerciales [9], pero los requerimientos de ingeniería más exigentes son los de la primera categoría. Dentro de las aplicaciones aeroespaciales se incluyen las carcasas de motor de cohetes, cuerpos de proyectiles, aspas de helicópteros, secciones y estabilizadores

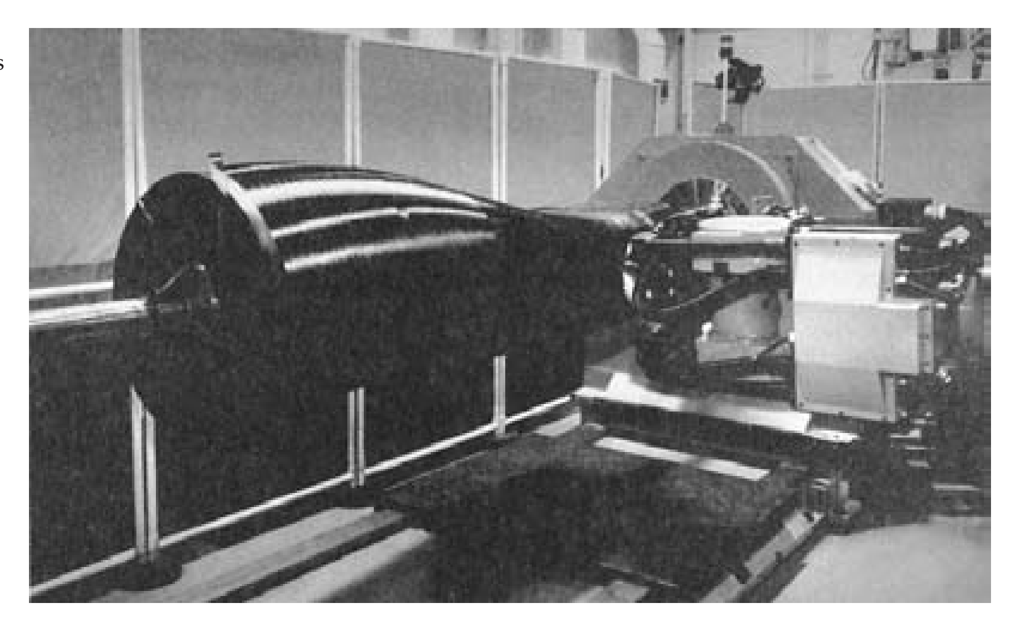


FIGURA 15.10 Máquina de bobinado de filamentos (Cortesía de Cincinnati Milacron).

de cola para aeroplanos. Estos componentes están fabricados con compuestos avanzados e híbridos (sección 9.4.1); los más comunes son las resinas epóxicas y reforzadas con fibras de carbono, boro, Kevlar y vidrio. Dentro de las aplicaciones comerciales se incluyen los tanques de almacenamiento, tubos reforzados y tubería, flechas motrices, alabes de turbinas de viento y barras pararrayos; éstas se encuentran fabricadas de FRP convencionales. Los polímeros incluyen resinas de poliéster, epóxicas y fenólicas; la fibra común para refuerzo es la de vidrio.

15.5 PROCESOS DE PULTRUSIÓN

El proceso básico de pultrusión se creó alrededor de 1950 para hacer cañas de pescar de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés). El proceso es similar a la extrusión (de aquí la similitud del nombre), pero implica el estirado de la pieza de trabajo (de aquí el prefijo inglés pul que se usa en lugar de ex). Como en la extrusión, la pultrusión produce secciones continuas, rectas de sección transversal constante. Se puede usar un proceso relacionado, llamado pulformado, para hacer piezas curvas, que además tengan variaciones en la sección recta a lo largo de la pieza.

15.5.1 Pultrusión

La ***pultrusión*** es un proceso en el cual se sumerge en un baño de resina una mecha continua de fibras y después se tira de ellas a través de un troquel formador donde se cura la resina impregnada. La disposición se esquematiza en la figura 15.11, que muestra cómo se corta el producto curado en grandes secciones rectas. Estas secciones quedan reforzadas con fibras continuas en toda su longitud. Como en la extrusión, las piezas tienen una sección transversal constante y un perfil determinado por la forma de la abertura del troquel.

El proceso consiste en cinco pasos (identificados en el esquema) que se ejecutan en una secuencia continua [1]: 1) ***alimentación de filamentos***, las fibras se surten de una estizola (anaqueles con clavijas que sostienen bobinas de filamento); 2) ***impregnación con resina***, las fibras se sumergen en la resina líquida no curada; 3) ***formado de un troquel previo***, en el cual se da gradualmente la forma aproximada de la sección transversal deseada a la colección de filamentos; 4) ***formado y curado***, se tira de las fibras impregnadas a través

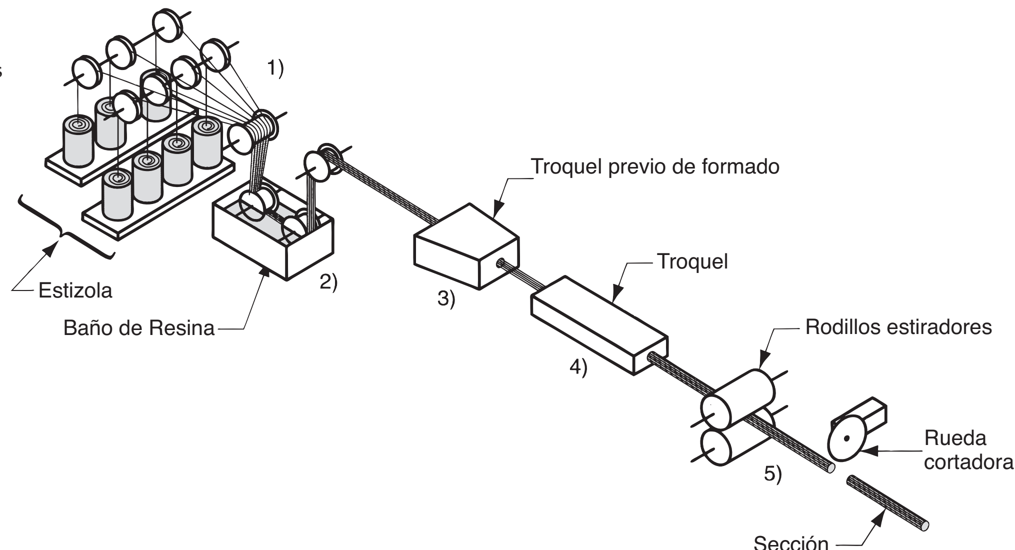


FIGURA 15.11 Proceso de pultrusión (véase el texto para interpretar los números de la secuencia).

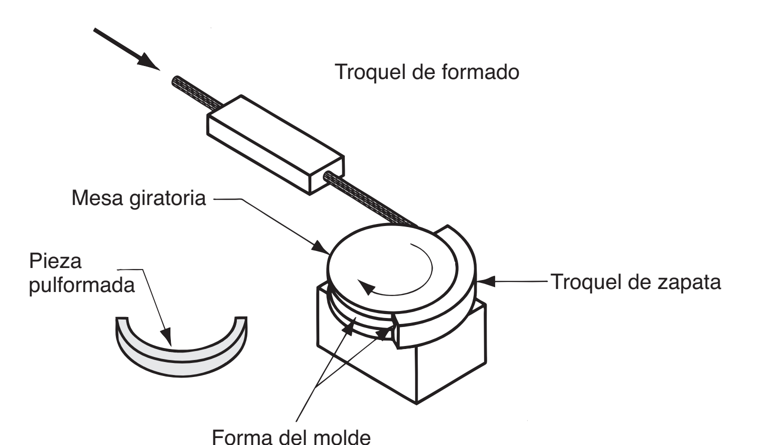


FIGURA 15.12 Proceso de pulformado (el esquema no muestra la operación de corte de la pieza pulformada).

del troquel caliente cuya longitud es de 1 a 1.5 m (3 a 5 ft) y cuyas superficies internas están altamente pulimentadas; y 5) ***estirado y cortado***, en donde se usan rodillos tractores para extraer del troquel la longitud curada, después de lo cual se corta mediante una rueda cortadora con granos de SiC o diamante.

Las resinas comunes usadas en pultrusión son poliésteres insaturados, epóxicos y silicones. Todas estas resinas son polímeros termofijos. El procesamiento de los polímeros epóxicos presenta dificultades debido a su adherencia en las superficies del troquel. Se ha estudiado también algunas posibles aplicaciones de los termoplásticos [1]. El vidrio-E es el material de refuerzo más ampliamente usado; sus proporciones fluctúan entre 30 y 70%. El módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión se incrementan con el contenido de refuerzo. Los productos hechos por pultrusión incluyen varillas sólidas, tubería, tiras de lámina plana, perfiles estructurales (como canales, vigas anguladas y compuestas), manivelas de herramientas para trabajo con alto voltaje y cubiertas para el carril conductor de trenes subterráneos.

15.5.2 Pulformado

Los procesos de pultrusión se limitan a secciones rectas de sección transversal constante. Hay también necesidad de piezas largas reforzadas con fibra continua, pero de forma más bien curva cuya sección transversal puede variar a través de su longitud. Para estas piezas menos regulares son apropiados los procesos de pulformado. El ***pulformado*** se puede definir como una pultrusión con pasos adicionales para formar un contorno semicircular y alterar la sección transversal en uno o más puntos a lo largo de su longitud. Un esquema del equipo se ilustra en la figura 15.12. Después de salir del troquel formador, la pieza continua de trabajo se alimenta dentro de una mesa giratoria con moldes negativos colocados en su periferia. El trabajo se fuerza dentro de las cavidades de los moldes por medio de un troquel de zapata que aprieta la sección transversal en varios puntos y forma la curvatura. El diámetro de la mesa determina el radio de la pieza. Conforme la pieza de trabajo sale de la mesa de troqueles, se corta a la longitud prevista para generar las piezas discretas. En el pulformado se utilizan también las resinas y fibras que se usan en la pultrusión. Una aplicación importante de este proceso es la producción de muelles de hoja para automóviles.

15.6 OTROS PROCESOS DE FORMADO PARA PMC

Son dignos de mencionarse algunos procesos para dar forma a los PMC entre los que se incluyen el vaciado centrifugado, el laminado de tubos, el laminado continuo y el corte.

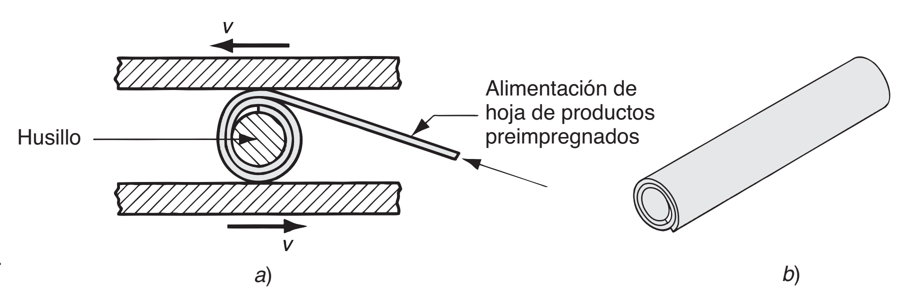


FIGURA 15.13 Laminado de tubos que muestra *a*) un medio posible de envolver productos preimpregnados de FRP alrededor de un husillo y *b*) el tubo terminado después del curado y de retirar el husillo.

Además, muchos de los procesos tradicionales de formado de termoplásticos son aplicables a los FRP (de fibras cortas) basados en polímeros TP; éstos incluyen el moldeo por soplado, el termoformado y la extrusión.

Vaciado centrifugado Este proceso es ideal para productos cilíndricos como tubos y tanques. El proceso es el mismo que su contraparte en fundición metálica (sección 11.3.4). Pequeños trozos de fibras, combinados con resina líquida, se vacían en un molde cilíndrico que gira rápidamente. La fuerza centrífuga presiona los ingredientes contra la pared del molde donde tiene lugar el curado. La superficie interna que resulta es bastante lisa. La contracción de la pieza o el uso de moldes hendidos permiten la remoción de la pieza.

Laminado de tubos Los tubos de FRP se pueden fabricar a partir de láminas con productos preimpregnados por una técnica de laminado [6], que se muestra en la figura 15.13. Dichos tubos se usan en cuadros de bicicletas y armaduras especiales. En el proceso, se envuelve alrededor de un husillo cilíndrico y varias veces una lámina con productos preimpregnados precortada para obtener la pieza de un tubo de un espesor conformado de múltiples capas. La lámina enrollada se encierra en una camisa que se contrae al calentarse y se cura en horno. Cuando la camisa se contrae, los gases atrapados los expulsa por los extremos del tubo. Cuando se completa el curado se retira el husillo para dejar un tubo laminado de FRP. La operación es simple y el costo de las herramientas es bajo. El proceso puede variar en cuanto a los diferentes métodos de envoltura y en el uso de moldes de acero para encerrar el rollo de productos preimpregnados y tener así un mejor control dimensional.

Laminado continuo En la construcción se usan paneles de plástico reforzado con fibra, algunas veces translúcidos y corrugados. Su producción involucra varios procesos: 1) impregnación de capas de esteras de fibra de vidrio o tela tejida por inmersión en resina líquida o pasándola bajo un bisturí, 2) unión entre películas de cubierta (celofán, poliéster u otro polímero) y 3) compactación entre rodillos de presión y curado; 4) el corrugado se agrega por medio de rodillos de formado o zapatas de molde.

Métodos de corte Los compuestos laminados FRP se cortan ya sea en el estado curado o no curado. Los materiales no curados (productos preimpregnados, preformas, SMC y otras formas iniciales) se cortan al tamaño para aplicación de capas, moldeado, etc. Las herramientas típicas de corte incluyen navajas, tijeras, cizallas de potencia y cizallas manuales. También se usan métodos no tradicionales de corte, como corte por rayo láser y por chorro de agua (capítulo 26).

Los FRP curados son duros, tenaces, abrasivos y difíciles de cortar. Pero es necesario cortarlos en muchos de los procesos de formado de FRP para eliminar el material en exceso, hacer agujeros y perfiles y para otros propósitos. Las herramientas de corte de carburo cementado y sierras de acero de alta velocidad se deben usar para cortar plásticos reforzados con fibra de vidrio. En algunos compuestos avanzados (por ejemplo boro-epóxico), se obtienen mejores resultados con las herramientas de corte con diamante. Se usa también con buenos resultados el corte con chorro de agua en los FRP curados; este proceso reduce el polvo y los problemas de ruido asociados con los métodos convencionales de aserrado.

REFERENCIAS

[1] Bader, M. G., Smith, W., Isham, A. B., Rolston, J. A. y Metzner, A. B. ***Delaware Composites Design Encyclopedia,*** Vol. 3. ***Processing and Fabrication Technology***. Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, P., 1990.

[2] Chawla, K. K. ***Composite Materials: Science and Engineering***. 2a. ed. Springer-Verlag, Nueva York, 1998.

[3] Charrier, J-M. ***Polymeric Materials and Processing***. Oxford University Press, Nueva York, 1991.

[4] Coulter, J. P. "Resin Impregnation During the Manufacture of Composite Materials," ***PhD Dissertation.*** University of Delaware, 1988.

[5] ***Engineering Materials Handbook***. Vol. 1. ***Composites***, ASM International, Metals Park, Ohio,1987.

[6] Mallick, P. K. ***Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design.*** 2a. ed. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1993.

[7] McCrum, N. G., Buckley, C. P. y Bucknall, C. B. ***Principles of Polymer Engineering.*** Oxford University Press, Inc., Oxford, U.K., 1988.

[8] Morton-Jones, D. H. ***Polymer Processing***. Chapman and Hall, London, U.K., 1989.

[9] Schwartz, M. M. ***Composite Materials Handbook***. 2a. ed. McGraw-Hill Company, Nueva York, 1992.

[10] Strong, A. B. ***Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1989.

[11] Wick, C., Benedict, J. T. y Veilleux, R. F. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook.*** 4a. ed., vol. II. ***Forming***, 1984.

[12] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook.*** 4a. ed., vol. III. ***Materials, Finishing and Coating,*** 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

15.1. ¿Cuáles son los polímeros usados más comúnmente en los polímeros reforzados con fibra?

15.2. ¿Cuál es la diferencia entre mecha e hilo?

15.3. ¿Qué es una estera en el contexto de los refuerzos de fibra?

15.4. ¿Por qué se dice que las partículas y las hojuelas son miembros de la misma clase de materiales de refuerzo?

15.5. ¿Qué es un compuesto para el moldeo de láminas (SMC)?

15.6. ¿En qué se diferencia un producto preimpregnado de un compuesto moldeado?

15.7. ¿Por qzzué los productos laminados de FRP hechos por el método de aspersión no son tan fuertes como los productos similares hechos por aplicación manual?

15.8. ¿Cuál es la diferencia entre la aplicación húmeda y la aplicación de productos preimpregnados en la aplicación manual de capas?

15.9. ¿Qué es un autoclave?

15.10. ¿Cuáles son algunas de las ventajas del procesamiento en molde cerrado para PMC en relación con el proceso del molde abierto?

15.11. Identifique algunas de las diferentes formas de compuestos de moldeo para PMC.

15.12. ¿Qué es el moldeo preformado?

15.13. Describa el moldeo por inyección con reacción reforzada (RRIM).

15.14. ¿Qué es el bobinado de filamentos?

15.15. ¿Cuál es la ventaja del control numérico computarizado sobre el control mecánico en el bobinado de filamentos?

15.16. Describa el proceso de pultrusión.

15.17. ¿En qué se diferencia el pulformado de la pultrusión?

15.18. ¿Con qué clase de productos se asocia el laminado de tubos?

15.19. ¿Cómo se cortan los FRP?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 14 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

15.1. ¿Cuál de los siguientes es el tipo de polímero más común en los compuestos de polímero de fibra reforzada: *a*) elastómeros, *b*) termoplásticos o *c*) termofijos?

15.2. ¿Dentro de cuál de las siguientes categorías se clasifica la mayoría de los productos de caucho? (tres respuestas mejores). *a*) elastómero reforzado con negro de humo, *b*) compuesto reforzado con fibra, *c*) compuesto reforzado con partículas, *d*) compuesto en matriz polimérica, *e*) elastómero puro y *f*) polímero puro?

15.3. Otros nombres para los procesos de moldeo abierto son los siguientes (dos respuestas mejores): *a*) moldeo por compresión, *b*) laminación por contacto, *c*) moldeo por contacto, *d*) bobinado de filamentos, *e*) moldeo de troquel de ajuste, *f*) moldeo preformado y *g*) pultrusión.

15.4. ¿En cuáles de las categorías generales siguientes de procesos de formado PMC se clasifica el aplicado manual (dos respuestas mejores): *a*) proceso de moldeo cerrado, *b*) moldeo por compresión, *c*) moldeo por contacto,

d) bobinado de filamentos o *e*) proceso de moldeo abierto?

15.5. ¿En qué superficie del producto laminado por el método de aplicado manual, un molde positivo con una superficie lisa producirá un buen acabado: *a*) superficie interior o *b*) superficie exterior?

15.6. ¿Una pieza moldeada con SMC es una forma de cuál de los siguientes procesos? *a*) moldeo por compresión, *b*) moldeo por contacto, *c*) moldeo por inyección, *d*) proceso en molde abierto, *e*) pultrusión o *f*) moldeo por transferencia.

15.7. ¿El bobinado de filamentos implica el uso de cuál de los siguientes refuerzos de fibra? *a*) filamentos continuos, *b*) telas, *c*) esteras, *d*) productos preimpregnados, *e*) fibras cortas o *f*) mechas tejidas.

15.8. En el bobinado de filamentos, cuando se enrolla un filamento alrededor de un husillo cilíndrico a un ángulo de hélice cercano a 90º ¿cómo se llama? *a*) bobinado biaxial, *b*) bobinado helicoidal, *c*) bobinado en aros, *d*) bobinado perpendicular, *e*) bobinado polar o *f*) bobinado radial.

15.9. ¿Cuál de los siguientes procesos de conformado de plásticos es similar a la pultrusión? *a*) moldeo por soplado, *b*) extrusión, *c*) moldeo por inyección o *d*) termoformado.

15.10. El corte con chorro de agua es una de las formas de cortar o recortar FRP curados o no curados; en el caso de FRP curados, el proceso es notable por su reducción de polvo y ruido: *a*) verdadero o *b*) falso.

Parte IV

Procesamiento de partículas para metales y cerámicos

16 METALURGIA DE POLVOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En esta parte del libro se estudia el procesamiento de metales y cerámicas que se encuentran en la forma de polvos, partículas sólidas muy pequeñas. En el caso de las cerámicas tradicionales, los polvos se forman aplastando y moliendo materiales que comúnmente se encuentran en la naturaleza, tales como los minerales de silicato (arcilla) y el cuarzo. En el caso de los metales y los nuevos materiales cerámicos (sección 7.3), los polvos se producen mediante una gran variedad de procesos industriales. En dos capítulos se estudiarán dichos procesos, así como los métodos que se utilizan para formar productos a partir de estos materiales: el capítulo 16 trata acerca de la metalurgia de polvos, mientras que el capítulo 17 estudia el procesamiento de cerámicas a nivel partícula.

La metalurgia de polvos (PM, por sus siglas en inglés) es una tecnología de procesamiento de metales en la que se producen piezas a partir de polvos metálicos. En la secuencia usual de producción de la PM, los polvos se comprimen para darles la forma deseada y luego se calientan para ocasionar la unión de partículas en una masa dura y rígida. La compresión, llamada ***prensado***, se realiza en una máquina tipo prensa cuyas herramientas se diseñan específicamente para la pieza que se va a producir. Las herramientas, que consisten generalmente en un troquel y uno o más punzones, pueden ser costosas y es por esto que la PM es más adecuada para niveles medios o altos de producción. El tratamiento térmico, llamado ***sinterizado***, se realiza a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal. El video clip titulado Metalurgia de Polvos ilustra la tecnología de producción de PM. Las consideraciones que hacen de la metalurgia de polvos un proceso importante desde el punto de vista comercial y tecnológico son las siguientes:

- Las piezas de PM se pueden producir masivamente en ***forma neta*** o ***casi neta***, eliminando o reduciendo la necesidad de procesos posteriores.
- Los procesos de la PM implican muy poco desperdicio de material: cerca de 97% de los polvos iniciales se convierten en producto. Esto se compara favorablemente con los procesos de fundición en los cuales las coladas, alimentadores y mazarotas son material de desperdicio en cada ciclo de producción.
- Debido a la naturaleza del material inicial en la PM, se pueden hacer piezas con un nivel específico de porosidad. Esta característica se presta a la producción de piezas de metal poroso, como rodamientos y engranes impregnados con aceite, así como filtros.
- Ciertos metales que son difíciles de fabricar por otros métodos se pueden formar por metalurgia de polvos. El tungsteno es un ejemplo: los filamentos de tungsteno que se usan en las lámparas incandescentes se fabrican con tecnología de PM.
- Ciertas combinaciones de aleaciones metálicas y cermets que no se pueden producir por otros métodos se pueden hacer por PM.
- La PM se compara favorablemente con la mayoría de los procesos de fundición en lo que se refiere al control dimensional de los productos. Las tolerancias rutinarias que se pueden lograr son de ±0.13 mm (±0.005 in).
- Los métodos de producción de PM se pueden automatizar para hacer más económica la operación.

Hay limitaciones y desventajas asociadas con el procesamiento de PM. Éstas incluyen: 1) alto costo del equipo y de las herramientas, 2) alto costo de los polvos metálicos, 3) dificultades en el almacenamiento y manejo de polvos metálicos (tales como degradación del metal a través del tiempo y riesgos de incendio del metal en polvo fino), 4) limitaciones en la forma de las piezas, debido a que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección lateral dentro del troquel durante el prensado, y las tolerancias deben permitir que la pieza pueda expulsarse del troquel después del prensado, y 5) las variaciones de la densidad del material a través de la pieza pueden ser un problema, especialmente para piezas de forma compleja.

Aunque se pueden producir piezas grandes hasta de 22 kg (50 lb), la mayoría de los componentes hechos por PM son menores de 2.2 kg (5 lb). Una colección típica de estas piezas se muestra en la figura 16.1. Las aleaciones de hierro, acero y aluminio constituyen el mayor tonelaje de metales que se usan en la PM. Otros metales incluyen cobre, níquel y metales refractarios como el molibdeno y el tungsteno. Los carburos metálicos como el carburo de tungsteno se incluyen frecuentemente dentro del campo de la metalurgia de polvos; sin embargo, como estos materiales son cerámicos, se estudiarán en el capítulo siguiente.

El desarrollo del campo moderno de la metalurgia de polvos se remonta al siglo XIX (véase nota histórica 16.1). El alcance de la tecnología moderna incluye no solamente la

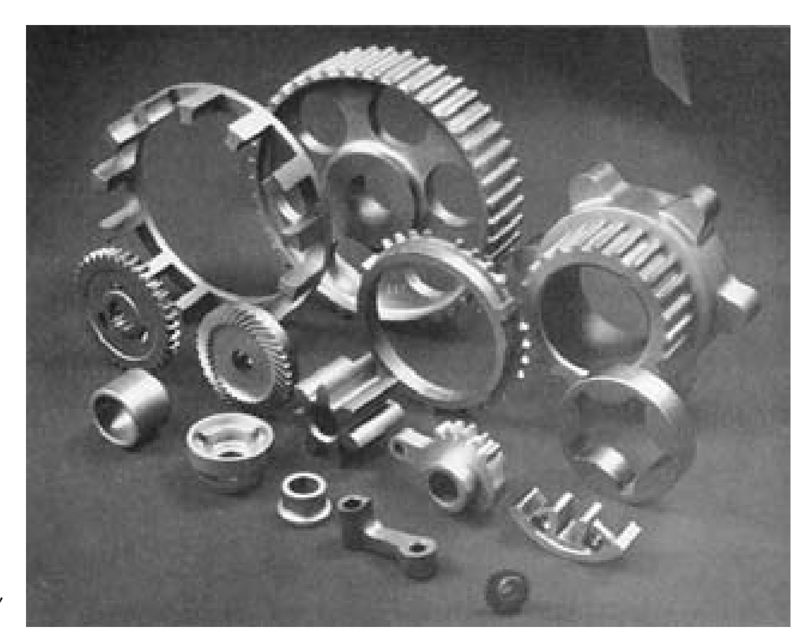


FIGURA 16.1 Una colección de piezas fabricadas mediante metalurgia de polvos (cortesía de Dorst America, Inc.).

producción de piezas, sino también la preparación de los polvos iniciales. El éxito en la metalurgia de polvos depende en gran parte de las características de los polvos iniciales; este tema se analizará en la sección 16.1. Las secciones siguientes describen la producción de polvos, el prensado y el sinterizado. Hay una correlación estrecha entre la tecnología de la PM y los aspectos del procesamiento de cerámicos (capítulo 17). En cerámica los materiales de partida son también polvos, así que los métodos para caracterizar los polvos están estrechamente relacionados con la PM. Varios de los métodos de formado son también similares.

Nota histórica 16.1 *Metalurgia de polvos*

Desde tiempos antiguos se ha usado polvos de metales como oro y cobre, así como algunos de los óxidos metálicos, con propósitos decorativos. Se usaban para decorar piezas de cerámica, como base de pinturas y cosméticos. Se cree que los egipcios usaban metalurgia de polvos para hacer herramientas desde fechas tan antiguas como el año 3000 a. C.

El campo moderno de la metalurgia de polvos data de los inicios del siglo XIX, al despertarse un gran interés por el platino. Alrededor de 1815, el inglés William Wollaston creó una técnica para preparar polvos de platino, compactarlos a alta presión y cocerlos (sinterizarlos) al rojo vivo. El proceso de Wollaston marca el principio de la metalurgia de polvos tal como se practica actualmente.

En 1870 se expidieron en Estados Unidos unas patentes de Gwynn relacionadas con rodamientos autolubricantes hechos por metalurgia de polvos. Él usó una mezcla de 99% de estaño pulverizado y 1% de petróleo, que mezclaba, calentaba y finalmente sometía a alta presión para elaborar la forma deseada dentro de la cavidad de un molde.

Hacia los primeros años del siglo XX, las lámparas incandescentes se habían convertido en un producto comercial importante. Se probó una serie de metales para los filamentos, como carbono, circonio, vanadio y osmio, pero se concluyó que el tungsteno era el mejor material para estos filamentos. El problema era la dificultad de procesar el tungsteno debido a su alto punto de fusión y a sus propiedades únicas. En 1908 William Coolidge creó un procedimiento que hizo posible la producción de filamentos para lámparas incandescentes. En este procedimiento se usaba polvo fino de óxido de tungsteno (WO_3) que se reducía a polvo metálico, se prensaba en piezas compactas, se presinterizaba, se forjaba en caliente en barras redondas, se sinterizaban y finalmente se estiraban con el fin de formar alambre para filamentos. El proceso Collidge se sigue usando hoy para producir los filamentos de los focos de luz incandescente.

En la década de 1920 se fabricaron herramientas de carburo cementado (WC-Co) mediante técnicas de metalurgia de polvos (véase nota histórica 7.2). A partir de la década 1930 se produjeron rodamientos autolubricantes. En las décadas 1960 y 1970 se produjeron en masa, particularmente en la industria automotriz, engranes y otros componentes mediante la metalurgia de polvos. Y en la década de 1980 se crearon piezas de metalurgia de polvos para motores de turbina para aviones.

16.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS POLVOS EN INGENIERÍA

Polvo es un sólido dividido en partículas finas. En esta sección se presentan las características de los polvos metálicos. Sin embargo, la revisión se aplica también a la mayoría de los polvos cerámicos.

16.1.1 Características geométricas

La forma de los polvos individuales se puede definir mediante los siguientes atributos: 1) tamaño de las partículas y su distribución, 2) forma y estructura interna de las partículas y 3) área superficial.

Tamaño de las partículas y su distribución El tamaño de las partículas se refiere a las dimensiones de los polvos individuales. Si la forma de la partícula es esférica, una sola dimensión es adecuada. Para otras formas, se necesitan dos o más dimensiones. Se dispone de varios métodos para obtener datos sobre el tamaño de las partículas. El método más común usa cribas de diferentes tamaños de malla. Se usa el término ***número de malla*** para referirse al número de aberturas por pulgada lineal de la criba. Un número de malla 200 significa que hay 200 aberturas por pulgada lineal. Como la malla es cuadrada, la cuenta es la misma en ambas direcciones, y el número total de aberturas por in^2 es 200^2 = 40 000. En consecuencia, un número alto de malla indica menor tamaño de partícula.

Las partículas se separan haciéndolas pasar a través de una serie de cribas de tamaños progresivamente menores de malla. Los polvos se colocan sobre una criba de un cierto número de malla y ésta se hace vibrar para que las partículas pequeñas que caben en las aberturas caigan a la siguiente criba. La segunda criba se vacía en la tercera y así sucesivamente, de manera que las partículas se seleccionan de acuerdo con su tamaño. Se puede designar a un cierto tamaño de polvo 230 por 200, lo cual indica que los polvos han pasado por la malla 200, pero no por la 230. Para simplificar la especificación, se dice que el tamaño de la partícula es de 200. El procedimiento para seleccionar los polvos por su tamaño se llama ***clasificación***.

Las aberturas en la criba son menores que el recíproco del número de malla debido al espesor del alambre en la criba, como se ilustra en la figura 16.2. Suponiendo que la dimensión limitante de la partícula es igual a la abertura de la criba, se tiene

$$PS = \frac{1}{MC} - t_w \tag{16.1}$$

donde PS = tamaño de partícula, in; MC = número de malla, aberturas por in lineal; y t_w = grueso del alambre de la malla, in. La figura muestra cómo pasarían las partículas pequeñas a través de las aberturas, mientras que las grandes se quedarían retenidas. Las variaciones que ocurren en la selección de tamaños de partículas mediante cribado se deben a las diferencias en la forma de las partículas, al rango de tamaños entre los números sucesivos de malla y a las variaciones de tamaños de las aberturas dentro de un número dado

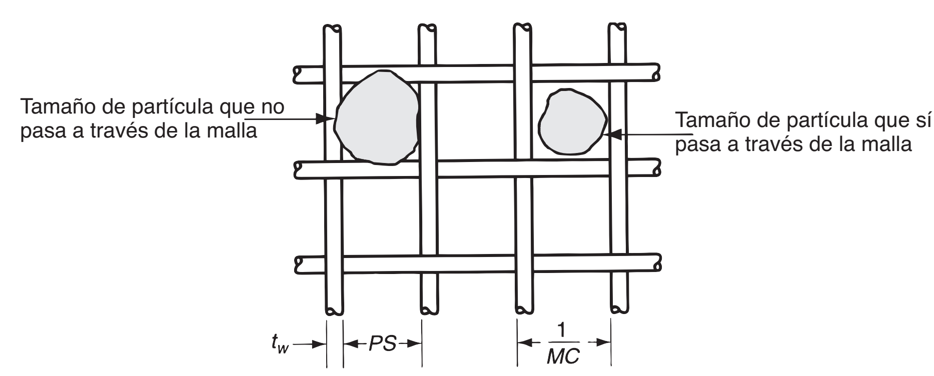


FIGURA 16.2 Malla de criba para seleccionar tamaños de partícula.

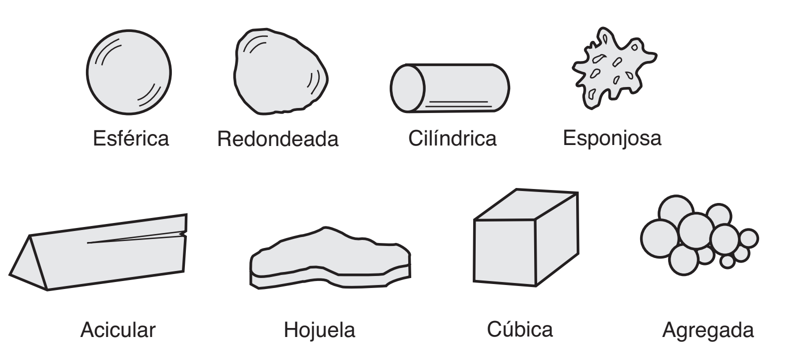


FIGURA 16.3 Varias formas posibles (ideales) de partícula en metalurgia de polvos.

de malla. Además, el método de cribado tiene un límite práctico superior de MC = 400 (aproximadamente) debido a la dificultad de hacer mallas tan finas y a la aglomeración de los polvos tan finos. Otros métodos para medir el tamaño de las partículas son por microscopia y técnicas de rayos X.

Los tamaños típicos de las partículas que se utilizan en la metalurgia de polvos convencional (comprimido y sinterizado) varían entre 25 y 300 μm (0.001 y 0.012 in).[1]

El extremo alto de este rango corresponde a un número de malla de aproximadamente 65. El otro extremo es muy pequeño para poderse medir mediante el método de número de malla.

Forma y estructura interna de las partículas La forma de los polvos metálicos puede catalogarse en varios tipos; algunos de ellos se ilustran en la figura 16.3. Existen variaciones tanto en la forma de las partículas de una colección de polvos como en sus tamaños. Una manera simple y útil de medir la forma es la razón del aspecto, la razón de la dimensión máxima y la mínima de una partícula dada. La razón del aspecto para una partícula esférica es 1.0; sin embargo, para un grano acicular puede ser de 2 a 4. Se requieren técnicas microscópicas para determinar las características de la forma.

Cualquier volumen de polvos sueltos contendrá poros entre las partículas. Éstos se llaman ***poros abiertos*** porque son externos a las partículas individuales. Los poros abiertos son espacios dentro de los cuales puede penetrar un fluido, como agua, aceite o un metal fundido. Además hay ***poros cerrados,*** que son vacíos internos en la estructura de una partícula individual. La existencia de estos poros internos generalmente es mínima, y sus efectos, cuando existen, son menores; no obstante, pueden influir en las medidas de la densidad, como se verá posteriormente.

Área superficial Suponiendo que la forma de la partícula sea una esfera perfecta, su área A y su volumen V están dados por:

$$A = \pi D^2 \tag{16.2}$$

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \tag{16.3}$$

donde D = diámetro de la partícula esférica, mm (in). La razón de área a volumen A/V para una esfera se determina entonces por:

$$\frac{A}{v} = \frac{6}{D} \tag{16.4}$$

En general, la razón de área a volumen puede expresarse para cualquier forma de partícula, esférica o no esférica, como sigue:

$$\frac{A}{V} = \frac{K_s}{D} \quad \text{o} \quad K_s = \frac{AD}{V} \tag{16.5}$$

[1] Estos valores son proporcionados por el profesor Wojciech Misiolek, mi colega en el Department of Materials Science and Engineering de la Universidad de Lehigh. La metalurgia de polvos es una de sus principales áreas de investigación.

donde K_S = factor de forma; y D en el caso general = diámetro de una esfera de volumen equivalente al de una partícula no esférica, mm (in). Entonces $K_S = 6.0$ para una esfera. Para formas de partícula diferentes a la esférica, $K_S > 6$.

De estas ecuaciones se puede inferir lo siguiente. A tamaños menores de partícula y factores de forma más altos (K_S), el área superficial será más alta para el mismo peso total de polvo metálico. Esto significa una mayor área donde puede ocurrir la oxidación. El tamaño más pequeño del polvo también conduce a una mayor aglomeración de las partículas, lo cual es una desventaja para la alimentación automática de los polvos. La razón para usar tamaños más pequeños de partículas es que suministran una contracción más uniforme y mejores propiedades mecánicas en los productos finales de la PM.

16.1.2 Otras características

Otras características de los polvos en ingeniería incluyen fricción interparticular, características de flujo, compactado, densidad, porosidad, composición química y películas superficiales.

Fricción interparticular y características de flujo La fricción entre las partículas afecta la disposición del polvo a fluir con facilidad y a compactarse firmemente. Una medida común de la fricción interparticular es el ***ángulo de reposo***, el cual es el ángulo formado por un montón de polvo cuando éste se vacía a través de un embudo angosto, tal como se muestra en la figura 16.4. Los ángulos más grandes indican mayor fricción entre partículas. Las partículas de menor tamaño por lo general muestran mayor fricción y grandes ángulos. Las formas esféricas producen la menor fricción interparticular, porque al desviarse de la forma esférica, se incrementa la fricción entre las partículas.

Las características de flujo son importantes durante el llenado del troquel y el prensado. El llenado automático del troquel depende de un flujo fácil y consistente de los polvos. En el prensado, la resistencia a fluir incrementa las variaciones de densidad en la parte compactada; estos gradientes de densidad son generalmente indeseables. Una medida común del flujo es el tiempo requerido para que una cierta cantidad de polvo (en peso) fluya a través de un embudo de tamaño estándar. Los tiempos menores de flujo indican mayor facilidad de flujo y menor fricción interparticular. Para reducir la fricción interparticular y facilitar el flujo durante el prensado, frecuentemente se añaden a los polvos pequeñas cantidades de lubricantes.

Empaquetamiento densidad y porosidad Las características de empaquetamiento dependen de dos medidas de densidad. Primero, la ***densidad real***, que es la densidad del volumen verdadero del material. Ésta es la densidad del material cuando los polvos se funden en una masa sólida, cuyos valores se dan en la tabla 4.1. Segundo, la ***densidad volumétrica*** es la densidad de los polvos en el estado suelto después de vaciado; éste incluye el efecto de los poros entre las partículas. Debido a los poros, la densidad volumétrica es menor que la densidad real.

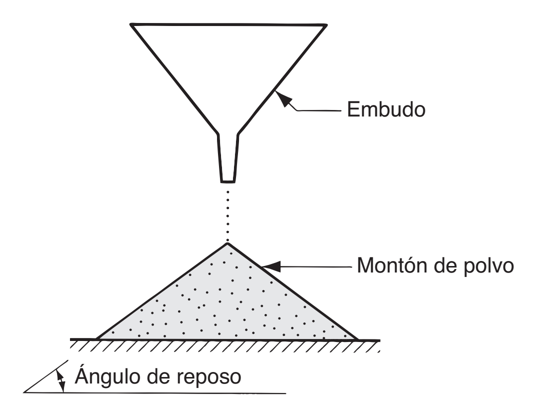


FIGURA 16.4 Fricción interparticular indicada por el ángulo de reposo de un montón de polvo vaciado desde un embudo angosto. A mayor ángulo, mayor fricción interparticular.

El ***factor de empaquetamiento*** es la densidad volumétrica dividida entre la densidad real. Los valores típicos para los polvos sueltos fluctúan entre 0.5 y 0.7. El factor de empaquetamiento depende de la forma y de la distribución de los tamaños de la partícula. Si están presentes polvos de varios tamaños, los polvos más finos se ajustarán entre los intersticios de los grandes, que de otra manera podrían ser tomados por el aire, lo que daría por resultado un factor de empaquetamiento más alto. Éste puede aumentarse también vibrando los polvos, lo cual ocasiona que se asienten más firmemente. Por último, se debe observar que la presión externa que se aplica durante la compactación, incrementa en gran medida el empaquetamiento de los polvos a través del rearreglo y deformación de las partículas.

La porosidad representa un camino alterno para considerar las características de empaquetamiento de un polvo. ***La porosidad*** se define como la razón del volumen de los poros (espacios vacíos) en el polvo, respecto al volumen volumétrico. En principio,

$$\text{Porosidad} + \text{factor de empaquetamiento} = 1.0 \tag{16.6}$$

Este asunto se complica por la posible existencia de poros cerrados en algunas de las partículas. Si el volumen interno de estos poros se incluye en la porosidad, entonces la ecuación es exacta.

Composición química y películas superficiales La caracterización del polvo no sería completa sin una identificación de su composición química. Los polvos metálicos se clasifican como elementales; esto significa que consisten en un metal puro o prealeado, en donde cada partícula es una aleación. Se revisarán estas clases y los metales que se usan comúnmente en la PM más detenidamente en la sección 16.5.1.

Las películas superficiales son un problema en la metalurgia de polvos debido a la gran área por unidad de peso del metal cuando se trata con polvos. Las posibles películas incluyen óxidos, sílice, materiales orgánicos adsorbidos y humedad [5]. Por lo general, estas películas deben removerse antes de procesar la forma.

16.2 PRODUCCIÓN DE POLVOS METÁLICOS

En general, los productores de polvos metálicos no son las mismas compañías que hacen las piezas de PM. Los productores de polvo son los proveedores y las plantas que manufacturan los componentes a partir de polvos metálicos son los clientes. Por tanto es apropiado separar la revisión de la producción de polvos (esta sección) de los procesos que se usan para hacer productos a partir de la PM (las siguientes secciones).

Prácticamente cualquier metal puede reducirse a la forma de polvo. Hay tres métodos principales para producir comercialmente polvos metálicos, cada uno de los cuales implica consumo de energía para incrementar el área superficial del metal. Los métodos son: 1) atomización, 2) químicos y 3) electrolíticos [10]. Ocasionalmente se usan métodos mecánicos para reducir el tamaño de los polvos; sin embargo, estos métodos se asocian más comúnmente con la producción de polvos cerámicos que se tratarán en el capítulo siguiente.

16.2.1 Atomización

La atomización implica la conversión de un metal fundido en un rocío de pequeñas gotas que se solidifican formando polvos. Es el método más versátil y popular para producir polvos metálicos en la actualidad, y aplicable a casi todos los metales, aleaciones o metales puros. Hay muchas maneras de crear el rocío de metal fundido; varias de ellas se ilustran en la figura 16.5. Dos de los métodos se basan en la ***atomización con gas***, en los que se utiliza una corriente de gas a alta velocidad (aire o gas inerte) para atomizar el metal líquido. En el inciso a de la misma figura, el gas fluye a través de una boquilla de expansión, succionando

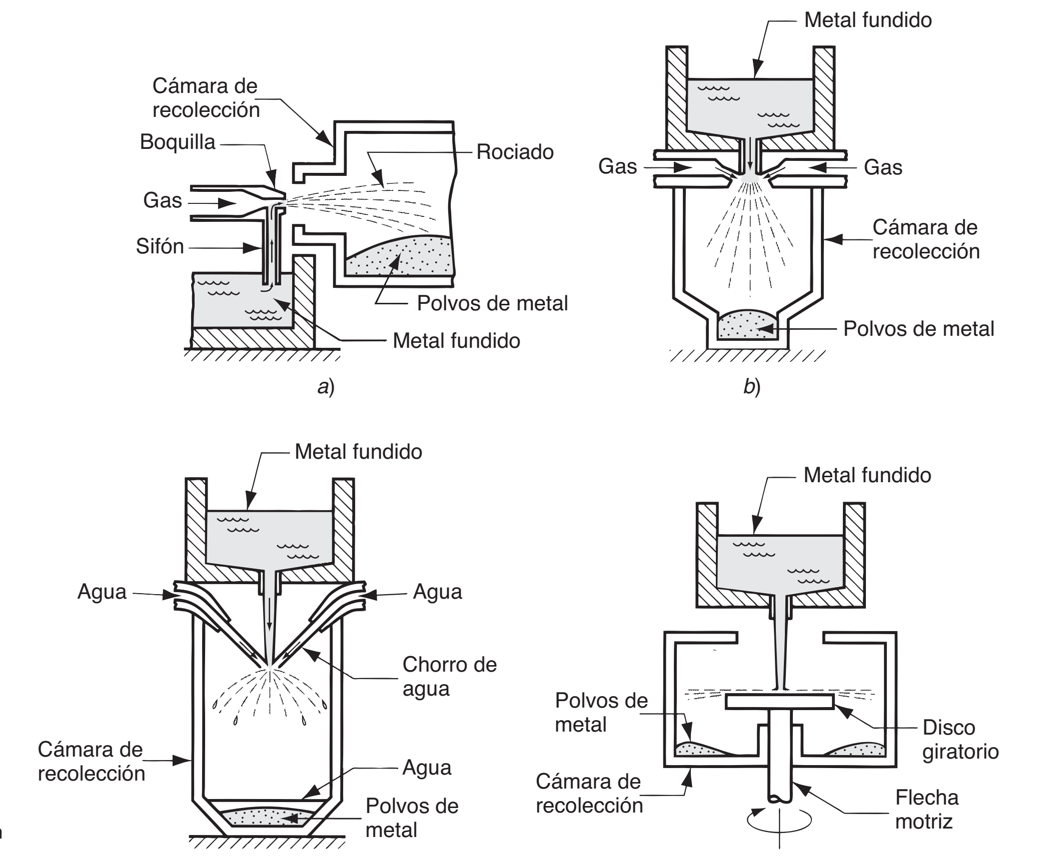


FIGURA 16.5 Varios métodos de atomización para producir polvos metálicos: *a*) y *b*) dos métodos de atomización por gas; *c*) atomización con agua y *d*) atomización centrífuga por el método de disco giratorio.

el metal líquido de la fusión que se encuentra debajo y rociándolo en un recipiente. Las gotas se solidifican en forma de polvo. En un método parecido que se muestra en el inciso b de la misma figura, el metal fundido fluye por gravedad a través de una boquilla y se atomiza inmediatamente por chorros de aire. Los polvos metálicos resultantes, los cuales tienden a ser esféricos, se recolectan en una cámara situada debajo.

El método que se ilustra en el inciso *c*) es similar al *b*), excepto que se utiliza una corriente de agua a alta velocidad en lugar de aire. Éste se conoce como ***atomizado por agua*** y es el más común de los métodos de atomizado, particularmente apropiado para metales que funden por abajo de 1 600 ºC (2 900 ºF). El enfriamiento es más rápido y la forma del polvo resultante es más irregular que esférica. La desventaja de usar agua es la oxidación en la superficie de las partículas. Una reciente innovación usa aceite sintético en lugar de agua para reducir la oxidación. En ambos procesos de atomizado con aire o agua, el tamaño de las partículas se controla en gran parte por la velocidad de la corriente de fluido; el tamaño de partícula varía en relación inversa con la velocidad.

Varios métodos se basan en el ***atomizado centrífugo***. Una versión es el ***método de disco rotatorio***, mostrado en el inciso d de la figura, donde se vacía una corriente de metal líquido en un disco que gira rápidamente y que rocía el metal en todas direcciones, pulverizándolo.

16.2.2 Otros métodos de producción

Entre otros métodos de producción de polvos se incluyen varios procesos de reducción química, métodos de precipitación y electrólisis.

La reducción química comprende una serie de reacciones químicas que reducen los compuestos metálicos a polvos metálicos elementales. Un proceso común consiste en

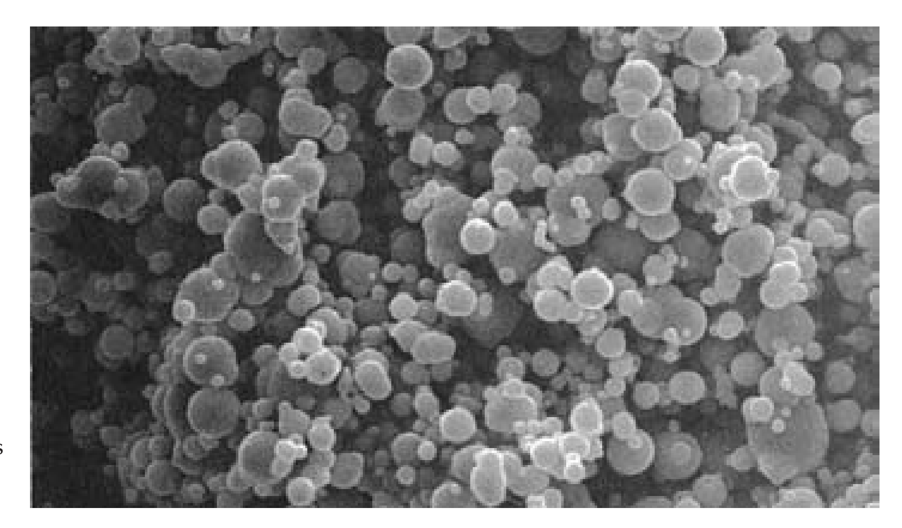


FIGURA 16.6 Polvos de hierro producidos por descomposición de pentacarbonilo de hierro; los tamaños de partícula fluctúan de 0.25 a 3.0 μm (10 a 125 μ-in) (foto cortesía de GAF Chemicals Corporation, Advanced Materials Division).

la liberación de los metales de sus óxidos mediante el uso de agentes reductores como hidrógeno o monóxido de carbono. El agente reductor se produce para combinarlo con el oxígeno del compuesto y liberar el elemento metálico. Por este método se producen polvos de hierro, de tungsteno y de cobre. Otro proceso químico para polvos de hierro implica la descomposición del pentacarbonilo de hierro para producir partículas esféricas de alta pureza. Los polvos producidos por este método se ilustran en la fotomicrografía de la figura 16.6. Otros procesos químicos incluyen la ***precipitación*** de elementos metálicos de sus sales disueltas en agua. Los polvos de cobre, níquel y cobalto se pueden producir por este método.

En la ***electrólisis*** se prepara una celda electrolítica en la cual la fuente del metal a pulverizar es el ánodo. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se mueve a través del electrólito y se deposita en el cátodo. El depósito se retira, se lava y se seca, obteniéndose un polvo metálico de alta pureza. Esta técnica se usa para obtener polvos de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio.

16.3 PRENSADO CONVENCIONAL Y SINTERIZADO

Después de la producción de polvos metálicos, la secuencia convencional de la metalurgia de polvos consiste en tres pasos: 1) combinación y mezclado de los polvos, 2) compactación, en la cual se prensan los polvos para obtener la forma deseada, y 3) sinterizado, que implica calentamiento a una temperatura por debajo del punto de fusión para provocar la unión de las partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la pieza. Estos tres pasos que algunas veces se aluden como operaciones primarias de la metalurgia de polvos se ilustran en la figura 16.7. En ocasiones también se ejecutan operaciones secundarias destinadas a mejorar la precisión dimensional, incrementar la densidad y para otros propósitos.

16.3.1 Combinación y mezclado de polvos

Para lograr buenos resultados en la compactación y el sinterizado, los polvos metálicos necesitan homogeneizarse por completo antes del proceso. Los términos combinación y mezclado se usan en este contexto. La ***combinación*** se refiere al intermezclado de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula. Los tamaños diferentes de partículas se combinan frecuentemente para reducir la porosidad. El ***mezclado*** se refiere a la mezcla de polvos de distinta composición química.

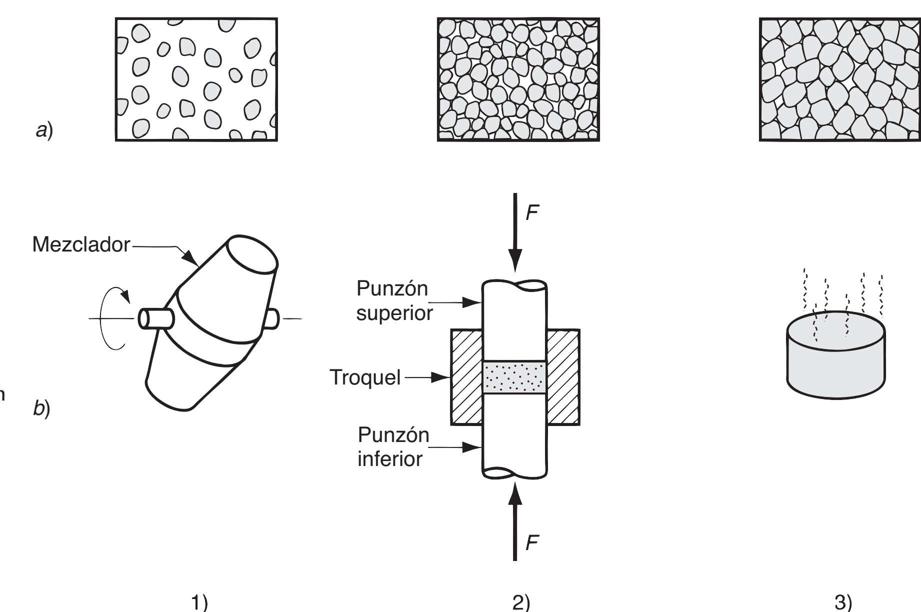


FIGURA 16.7 Secuencia convencional de producción en metalurgia de polvos: 1) mezclado, 2) compactado y 3) sinterizado; en *a*) se muestra la condición de las partículas, mientras que en *b*) se muestran las operaciones y la pieza durante la secuencia.

Una ventaja de la tecnología de metalurgia de polvos es la oportunidad de combinar varios metales en aleaciones que sería difícil o imposible producir por otros medios. La diferencia entre mezclado y combinación no siempre es precisa en la práctica industrial.

El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos. Algunas alternativas se ilustran en la figura 16.8; éstas son: *a*) por rotación en tambor, *b*) por rotación en un recipiente de cono doble, *c*) por agitación en un mezclador de tornillo y *d*) por agitación en un mezclador de paletas. En estos dispositivos hay más ciencia de la que se puede sospechar. Los mejores resultados se obtienen cuando se llenan entre 20% y 40% de su capacidad. Los recipientes se diseñan generalmente con deflectores internos u otras formas para impedir la caída libre durante el mezclado de polvos de diferentes tamaños, debido a que las variaciones en la velocidad de asentamiento de los distintos tamaños generan segregación, precisamente lo contrario de lo que se busca con la combinación. No es conveniente que los polvos se sometan a vibración, ya que esto también produce segregación.

Generalmente se añaden otros ingredientes a los polvos metálicos durante el paso de combinación o mezclado. Estos aditivos son: 1) ***lubricantes***, como los estearatos de zinc y de aluminio en pequeñas cantidades para reducir la fricción entre las partículas y en las paredes del troquel durante la compactación; 2) ***aglutinantes***, que se requieren en algunos casos para lograr una resistencia adecuada en las piezas prensadas pero no sinterizadas; y 3) ***desfloculantes***, que inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar sus características de flujo durante el procesamiento subsecuente.

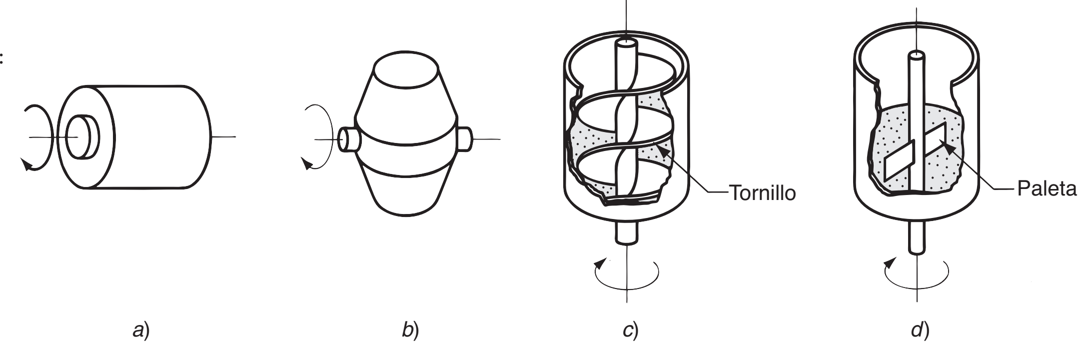


FIGURA 16.8 Varios dispositivos de combinación y mezclado: *a*) tambor rotatorio, *b*) doble cono rotatorio, *c*) mezclador de tornillo y *d*) mezclador de paletas.

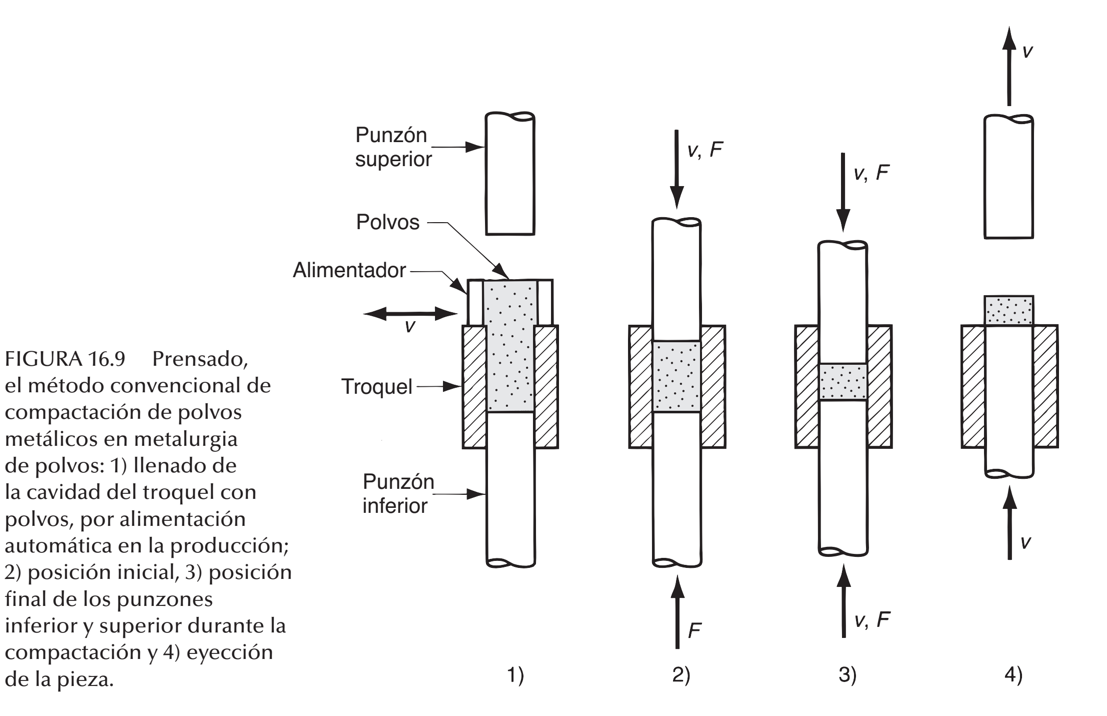
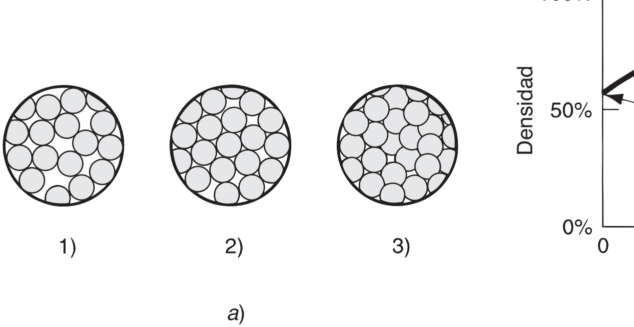


FIGURA 16.9 Prensado, el método convencional de compactación de polvos metálicos en metalurgia de polvos: 1) llenado de la cavidad del troquel con polvos, por alimentación automática en la producción; 2) posición inicial, 3) posición final de los punzones inferior y superior durante la compactación y 4) eyección de la pieza.

16.3.2 Compactación

En la compactación se aplica alta presión a los polvos para darles la forma requerida. El método convencional de compactación es el ***prensado***, en el cual punzones opuestos aprietan el polvo contenido en un troquel. Los pasos en el ciclo de prensado se muestran en la figura 16.9. A la pieza de trabajo después de prensada se le llama ***compactado fresco***; el término ***fresco*** significa que la pieza no está completamente procesada. Como resultado del prensado, la densidad de la pieza, llamada ***densidad fresca***, es mucho más grande que la densidad volumétrica inicial. La ***resistencia fresca*** de la pieza es adecuada para el manejo cuando es prensada, pero mucho menor que la que se logra después del sinterizado.

La presión que se aplica en la compactación produce inicialmente un rempaquetamiento de los polvos en un arreglo más eficiente, eliminando los "puentes" que se forman durante el llenado, reduciendo el espacio de los poros e incrementando el número de puntos de contacto entre las partículas. Al incrementarse la presión, las partículas se deforman plásticamente, ocasionando que el área de contacto interparticular aumente y entren en contacto partículas adicionales. Esto viene acompañado de una reducción posterior del volumen de los poros. La progresión se ilustra en la figura 16.10 para partículas iniciales de forma



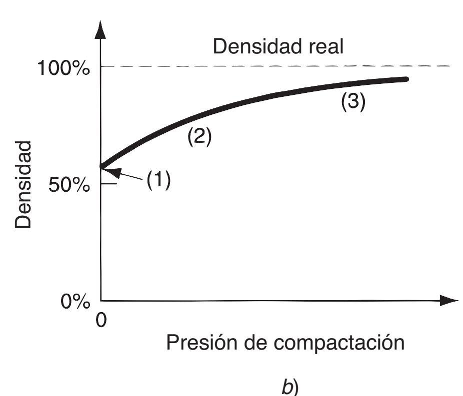


FIGURA 16.10 *a*) Efecto de la presión aplicada durante la compactación: 1) polvos sueltos iniciales después del llenado, 2) rempaquetamiento y 3) deformación de las partículas; y *b*) densidad de los polvos en función de la presión. La secuencia corresponde a los pasos 1, 2 y 3 de la figura 16.9.

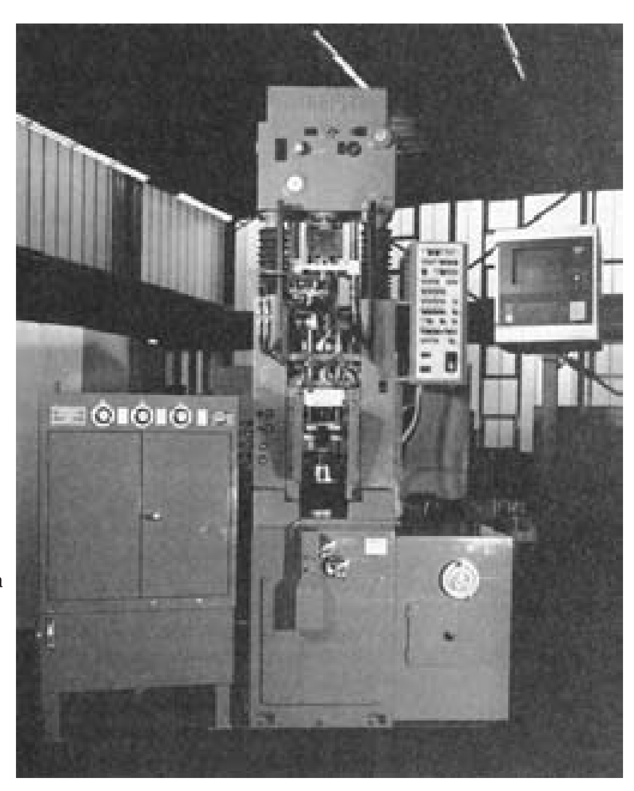


FIGURA 16.11 Prensa hidráulica de 450 kN (50 ton) para compactación de componentes de metalurgia de polvos. Esta prensa tiene la capacidad de actuar en niveles múltiples para producir piezas de formas complejas en metalurgia de polvos. (Foto cortesía de Dorst America, Inc.).

esférica. También se muestra la densidad asociada, representada para las tres vistas como una función de la presión aplicada.

Las prensas usadas en la compactación convencional en la metalurgia de polvos son mecánicas, hidráulicas o una combinación de las dos. En la figura 16.11 se muestra una unidad hidráulica de 450 kN (50 ton). Debido a diferencias en la complejidad de las piezas asociadas a los requerimientos de prensado, las prensas se pueden clasificar en 1) prensado en una dirección, con prensas de acción simple; o 2) prensado en dos direcciones, con prensas de varios tipos, incluyendo las de arietes hidráulicos opuestos, de doble acción o de múltiple acción. La tecnología de las prensas comúnmente disponibles puede suministrar hasta diez acciones de control separadas para producir piezas de forma bastante compleja. Se examinará la complejidad de las piezas y otros aspectos de diseño en la sección 16.6.

La capacidad de una prensa para producción en PM se da generalmente en toneladas, o kN o MN. La fuerza requerida para el prensado depende del área proyectada de la pieza (área en el plano horizontal para una prensa vertical) multiplicada por la presión necesaria para compactar los polvos del metal; expresando esto en forma de ecuación,

$$F = A_p p_c \tag{16.7}$$

donde F = fuerza requerida, N (lb); A_p = área proyectada de la pieza, mm^2 (in^2); y p_c = presión de compactación requerida para el material del polvo dado, MPa (lb/in^2). Las presiones típicas de compactación fluctúan entre 70 MPa (10 000 lb/in^2) para polvos de aluminio y 700 MPa (100 000 lb/in^2) para polvos de hierro y acero.

16.3.3 Sinterizado

Después del prensado, el compactado fresco carece de fuerza y resistencia: se desmorona fácilmente al menor esfuerzo. El ***sinterizado*** es una operación de tratamiento térmico

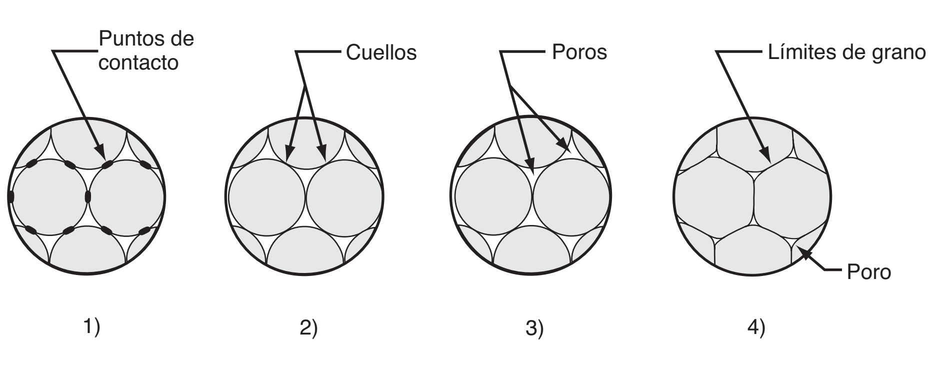


FIGURA 11.12 Sinterizado a escala microscópica: 1) la unión de las partículas se inicia en los puntos de contacto, 2) los puntos de contacto crecen para convertirse en "cuellos", 3) los poros entre las partículas reducen su tamaño y 4) se desarrollan límites de grano entre las partículas, en las regiones donde había cuellos.

que se ejecuta sobre el compactado para unir sus partículas metálicas, incrementando de esta manera su fuerza y resistencia. El tratamiento se lleva a cabo generalmente a temperaturas entre 0.7 y 0.9 del punto de fusión del metal (en la escala absoluta). El término ***sinterizado en estado sólido*** o ***sinterizado en fase sólida*** se usa algunas veces para este sinterizado convencional debido a que el metal permanece sin fundir a la temperatura del tratamiento.

En opinión de los investigadores, la fuerza básica que mueve al sinterizado es la reducción de la energía superficial [5], [12]. El compactado fresco consiste en muchas partículas distintas que tienen su propia superficie; por tanto, el área superficial total contenida en el compactado es muy alta. Bajo la influencia del calor, el área se reduce por la formación y crecimiento de las uniones entre las partículas; esto implica la reducción de la energía superficial. Mientras más fino sea el polvo inicial, más alta será la superficie del área total y más grande la fuerza que mueve al proceso.

La serie de dibujos en la figura 16.12 muestra en escala microscópica los cambios que ocurren durante el sinterizado de los polvos metálicos. El sinterizado implica transporte de masa para crear los cuellos y transformarlos en límites de grano. El principal mecanismo para que esto ocurra es la difusión; otro posible mecanismo es el flujo plástico. La contracción ocurre durante el sinterizado como resultado de la reducción del tamaño de los poros. Esto depende en gran medida de la densidad del compactado fresco, y ésta a su vez de la presión durante la compactación. Cuando las condiciones del procesamiento se controlan estrechamente, la contracción generalmente es predecible.

Dado que las aplicaciones de la PM involucran generalmente producciones medianas o altas, la mayoría de los hornos de sinterizado se diseñan con dispositivos mecanizados para el traslado de las piezas de trabajo durante el proceso. El tratamiento térmico consiste en tres pasos realizados en tres cámaras de hornos continuos: 1) precalentado, en el cual se queman los lubricantes y los aglutinantes, 2) sinterizado y 3) enfriado. El tratamiento se ilustra en la figura 16.13. Las temperaturas típicas y los tiempos de sinterizado se proporcionan en la tabla 16.1 para metales seleccionados.

En la práctica moderna del sinterizado se controla la atmósfera del horno. Los propósitos de la atmósfera controlada son: 1) proteger de la oxidación, 2) proporcionar una atmósfera reductora para remover los óxidos existentes, 3) suministrar una atmósfera carburizadora y 4) ayudar a la remoción de los lubricantes y aglutinantes que se usan en el prensado. Las atmósferas de los hornos de sinterizado comunes son: de gas inerte, basadas en nitrógeno, de amoniaco disociado, de hidrógeno y basadas en gas natural [5]. Las atmósferas al vacío se usan para ciertos metales, como los aceros inoxidables y el tungsteno.

16.3.4 Operaciones secundarias

Las funciones de las operaciones secundarias son varias, incluidas la densificación, el dimensionamiento, la impregnación, la infiltración, el tratamiento térmico y el acabado.

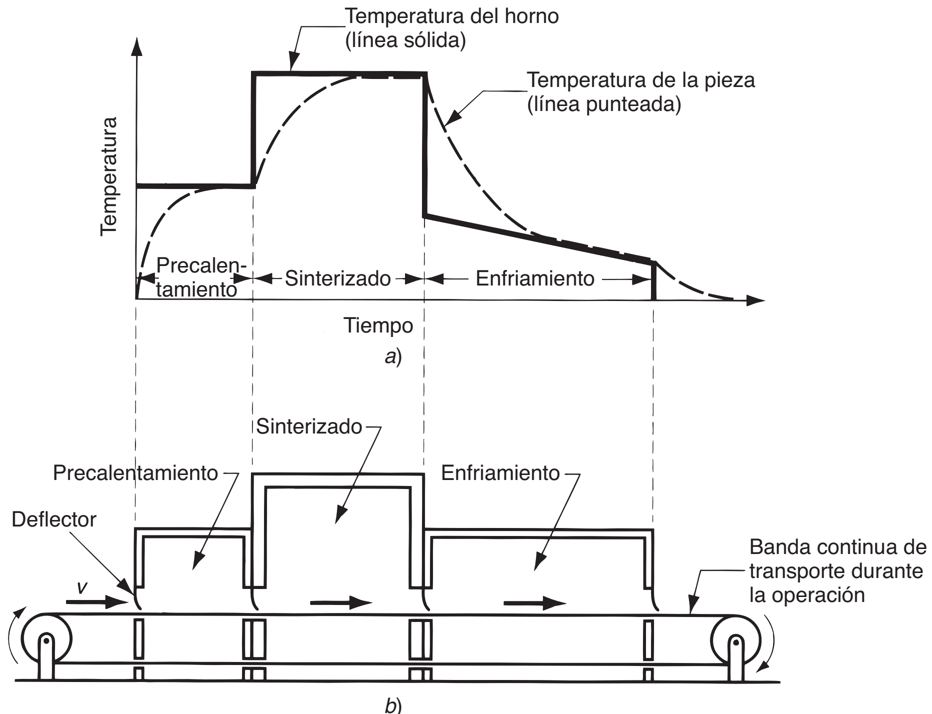


FIGURA 16.13
a) Ciclo típico de tratamiento térmico durante el sinterizado y *b*) sección transversal esquemática de un horno continuo de sinterizado.

Densificación y dimensionamiento Numerosas operaciones secundarias se ejecutan para aumentar la densidad y mejorar la precisión, o para lograr formas adicionales en las piezas sinterizadas. El ***reprensado*** es una operación de prensado en la cual se aprieta la pieza en un troquel cerrado para aumentar la densidad y mejorar las propiedades físicas. El ***dimensionamiento*** es la compresión de una pieza sinterizada para mejorar su precisión dimensional. El ***acuñado*** es una operación de prensado sobre una pieza sinterizada para imprimir detalles en su superficie.

Algunas piezas sinterizadas requieren un ***maquinado*** posterior. Rara vez se utiliza el maquinado para dimensionar las piezas; más bien se usa para crear características geométricas que no se pueden lograr por prensado, como son cuerdas internas o externas, perforaciones laterales y otros detalles.

Impregnación e infiltración La porosidad es una característica única e inherente a la tecnología de metalurgia de polvos. Ésta se puede aprovechar para crear productos especiales, llenando el espacio disponible en los poros con aceite, polímeros o metales que tienen un punto de fusión más bajo que la base del metal en polvo.

TABLA 16.1 Temperaturas y tiempos típicos de sinterizado para polvos de metales seleccionados.

	Temperaturas de sinterizado		
Metal	°C	°F	Tiempo típico
Latón	850	1 600	25 min
Bronce	820	1 500	15 min
Cobre	850	1 600	25 min
Hierro	1 100	2 000	30 min
Acero inoxidable	1 200	2 200	45 min
Tungsteno	2 300	4 200	480 min

Recopilada de [8] y [13].

Impregnación es el término que se usa cuando se introduce aceite u otro fluido dentro de los poros de una pieza sinterizada. Los productos más comunes de este proceso son los rodamientos impregnados con aceite: los engranes y componentes similares de maquinaria. Los rodamientos autolubricados, fabricados usualmente de bronce o hierro con 10 a 30% de aceite en volumen, se usan ampliamente en la industria automotriz. Los tratamientos se realizan mediante inmersión de las piezas sinterizadas en un baño de aceite caliente.

Una aplicación alterna de la impregnación involucra a las piezas de la metalurgia de polvos, a las que se les debe ejercer una presión fuerte o impenetrable a los fluidos. En este caso, las piezas se impregnan con varios tipos de resinas de polímeros que ingresan en los espacios de los poros en forma líquida y luego se solidifican. En algunos casos, la impregnación de resina se utiliza para facilitar el procesamiento subsecuente, por ejemplo, para permitir el uso de soluciones de procesamiento (como los químicos para chapado) que de otra forma empaparían los poros y degradarían el producto, o mejorarían el maquinado de la pieza de la metalurgia de polvos.

La ***infiltración*** es una operación en la cual se llenan los poros de las piezas de PM con un metal fundido. El punto de fusión del metal de relleno debe ser menor que el de la pieza. El proceso implica calentar el metal de relleno en contacto con el componente sinterizado, de manera que la acción de capilaridad haga fluir al relleno dentro de los poros. La estructura resultante es relativamente no porosa y la pieza infiltrada tiene una densidad más uniforme, así como una tenacidad y una resistencia mejoradas. Una aplicación de este proceso es la infiltración con cobre de las piezas con PM de hierro sinterizado.

Tratamiento térmico y acabado Los componentes de polvos metálicos pueden tratarse térmicamente (capítulo 27) y terminarse (galvanoplastia o pintura, capítulo 29) por la mayoría de las operaciones que se usan en las piezas fabricadas por fundición y otros procesos de trabajo de metales. Debido a la porosidad de las piezas sinterizadas, se debe tener cuidado con algunos de estos tratamientos por ejemplo, no deben usarse los baños de sales para calentar estas piezas. Se pueden; aplicar a las piezas sinterizadas operaciones de chapeado y recubrimiento con fines de apariencia y resistencia a la corrosión. Se debe tener cuidado para evitar que las soluciones químicas queden atrapadas en los poros; frecuentemente se usan la impregnación y la infiltración para este propósito. Los chapeados comunes para piezas sinterizadas incluyen cobre, níquel, cromo, zinc y cadmio.

16.4 ALTERNATIVAS DE PRENSADO Y TÉCNICAS DE SINTERIZADO

La secuencia convencional de prensado y sinterizado es la más utilizada en la tecnología de la metalurgia de polvos. Los métodos para procesamientos adicionales se analizan en esta sección. Estos métodos se ubican en tres categorías: 1) métodos de compactación alternativa, 2) combinación de compactación y sinterizado, y 3) métodos alternativos de sinterizado.

16.4.1 Prensado isostático

Una característica del prensado convencional es que la presión se aplica uniaxialmente. Esto impone limitaciones sobre la forma de la pieza, ya que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección perpendicular a la aplicación de la presión. El prensado uniaxial produce también variaciones de densidad en la compactación, después del prensado. En el ***prensado isostático***, la presión se aplica en todas direcciones contra los polvos contenidos en el molde flexible; para lograr la compactación se usa la presión hidráulica. El prensado isostático puede hacerse de dos formas: 1) prensado isostático frío y 2) prensado isostático caliente.

El ***prensado isostático frío*** (CIP, por sus siglas en inglés) es un compactado que se realiza a temperatura ambiente. El molde, hecho de caucho u otro material elastómero, se

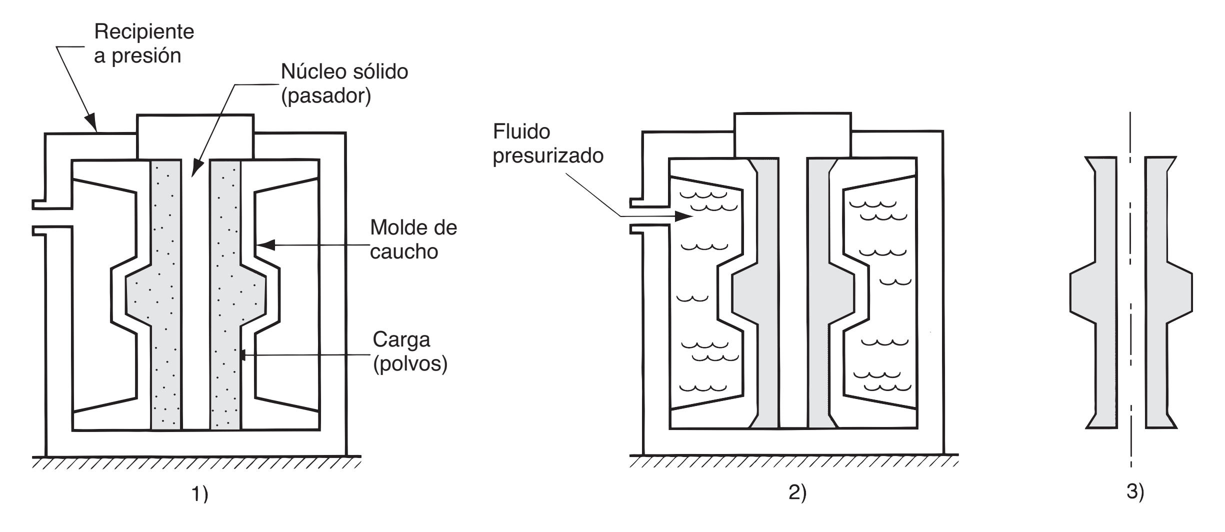


FIGURA 16.14 Prensado isostático en frío: 1) se colocan los polvos en el molde flexible, 2) se aplica presión hidrostática sobre el molde para compactar los polvos y 3) se reduce la presión y se retira la pieza.

sobredimensiona para compensar la contracción. Se usa agua o aceite para ejercer la presión hidrostática contra el molde dentro de la cámara. La figura 16.14 ilustra la secuencia del proceso en prensado isostático en frío. Las ventajas del CIP incluyen una densidad más uniforme, herramientas menos costosas y mayor aplicación a corridas cortas de producción. Es difícil lograr una buena precisión dimensional en el prensado isostático debido a la flexibilidad del molde. En consecuencia, se requieren operaciones de formado y acabado antes o después del sinterizado, para obtener las dimensiones requeridas.

El prensado isostático caliente (HIP, por sus siglas en inglés) se lleva a cabo a alta presión y temperatura, usando como medio de compresión un gas que puede ser argón o helio. El molde que contiene los polvos se hace de lámina de metal para resistir altas temperaturas. El HIP realiza en un paso el prensado y la sinterización. A pesar de esta aparente ventaja, es un proceso relativamente costoso y sus aplicaciones parecen concentrarse actualmente en la industria aeroespacial. Las piezas de PM hechas por HIP se caracterizan por su alta densidad (porosidad cercana a cero), unión interparticular completa y buena resistencia mecánica.

16.4.2 Moldeo por inyección de polvos

El moldeo por inyección se asocia estrechamente con la industria de los plásticos (sección 13.6). Se puede aplicar el mismo proceso básico para formar piezas de polvos metálicos o cerámicos; la diferencia es que el polímero inicial contiene una alta proporción de materia particulada, típicamente entre 50% y 85% en volumen. En metalurgia de polvos, se usa el término ***moldeo por inyección metálica*** (MIM). El proceso más general es el ***moldeo por inyección de polvos*** (PIM, por sus siglas en inglés), que incluye polvos metálicos y cerámicos. En MIM, los pasos son los siguientes [6]: 1) los polvos metálicos se mezclan con un aglutinante apropiado; 2) se forman pelets granulares con la mezcla; 3) los pelets se calientan a la temperatura de moldeo, se inyectan en la cavidad de un molde y la pieza se enfría y retira del molde, 4) se procesa la pieza para remover el aglomerante mediante varias técnicas térmicas o por solvente; 5) la pieza se sinteriza y 6) se ejecutan las operaciones secundarias que se requieran.

El aglutinante actúa como un portador de partículas en el moldeo por inyección de polvos. Sus funciones son aportar características apropiadas de flujo durante el moldeo y sostener los polvos en la forma moldeada hasta el sinterizado. Los cinco tipos básicos de aglutinantes en PIM son: 1) los polímeros termofijos, como los fenólicos, 2) los polímeros

termoplásticos, como el polietileno, 3) el agua, 4) los geles, 5) los materiales inorgánicos [6]. Los tipos que se usan con mayor frecuencia son los polímeros.

El moldeo por inyección de polvos es apropiado para formar piezas similares a las del moldeo por inyección de plásticos. Su costo no es competitivo para piezas de simetría axial simple, ya que en estos casos es adecuado el método de prensado convencional y sinterizado. El PIM parece más económico para pequeñas piezas complejas de alto valor. La contracción que acompaña a la densificación durante el sinterizado limita la precisión dimensional.

16.4.3 Laminado de polvos, extrusión y forjado

La laminación, la extrusión y el forjado son procesos volumétricos característicos del formado de metales (capítulo 19). Se describen en este contexto de la metalurgia de polvos.

Laminación de polvos Los polvos pueden comprimirse en una operación de laminado para formar material metálico en tiras. El proceso se dispone comúnmente para operar de manera continua o semicontinua, como se muestra en la figura 16.15. Los polvos metálicos se compactan entre dos rodillos para formar una tira fresca con la que se alimenta directamente a un horno de sinterizado. Después se enfría, se lamina y se vuelve a sinterizar.

Extrusión de polvos La extrusión es un proceso básico de manufactura (sección 1.3.1). En la extrusión de polvos, el polvo inicial puede tener formas diferentes. En el método más popular, los polvos se colocan al vacío en una lata de lámina metálica hermética, se calientan y se extruyen junto con el recipiente. En otra variante, se preforman los tochos por un proceso de prensado convencional y sinterización, y después se extruyen en caliente. Estos métodos alcanzan un alto grado de densificación en los productos de PM.

Forjado de polvos El forjado es un proceso importante en el formado de metal (sección 1.3.1). En el ***forjado de polvos***, la parte inicial es una pieza de metalurgia de polvos preformada mediante prensado y sinterizado al tamaño apropiado. Las ventajas de este método son: 1) la densificación de la pieza de PM; 2) el costo de las herramientas es más bajo y se requieren pocos "golpes" durante la forja (y por tanto mayor velocidad de producción), ya que la pieza inicial está preformada y 3) poco desperdicio de material.

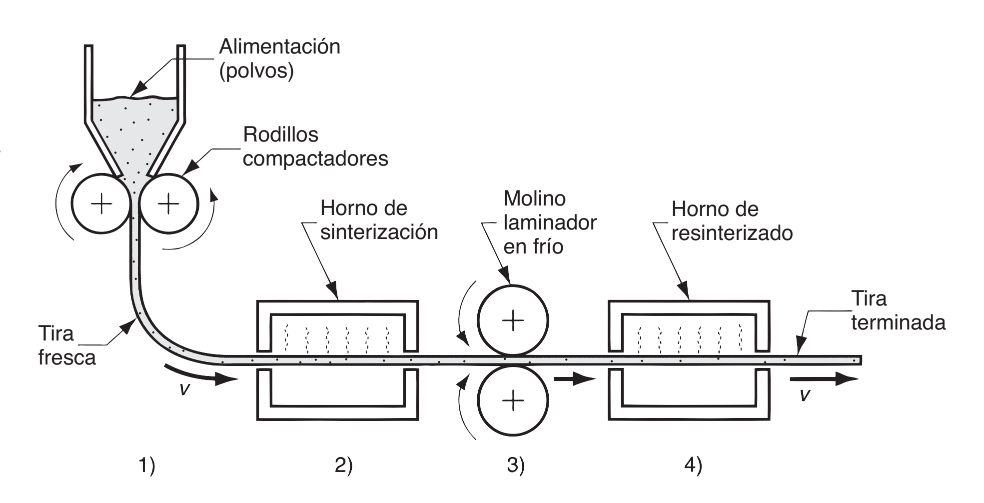


FIGURA 16.15 Laminado de polvos: 1) se alimentan los polvos a través de los rodillos compactadores para formar una tira fresca, 2) sinterizado, 3) laminado en frío y 4) resinterizado.

16.4.4 Combinación de prensado y sinterizado

El prensado isostático caliente (sección 16.4.1) alcanza la compactación y el sinterizado en un solo paso. Otras técnicas que combinan los dos pasos son el prensado caliente y el sinterizado por chispas.

Prensado caliente La disposición de un proceso de prensado caliente uniaxial es muy similar al prensado de PM convencional, excepto que el calor se aplica durante la compactación. El producto resultante es generalmente duro, denso, fuerte y bien dimensionado. A pesar de estas ventajas, el proceso presenta ciertos problemas técnicos que limitan su adopción. Los principales problemas son: 1) la selección del material del molde que pueda soportar las altas temperaturas de sinterización, 2) los largos ciclos de producción que se requieren para realizar la sinterización y 3) el calentamiento y el mantenimiento de un control atmosférico en el proceso [1]. El prensado caliente tiene algunas aplicaciones en la producción de productos sinterizados de carburo usando moldes de grafito.

Sinterizado por chispas Es una alternativa que combina el prensado y el sinterizado, pero que supera algunos de los problemas del prensado caliente. El proceso consiste en dos pasos básicos [1], [13]: 1) los polvos o un compactado fresco preformado se colocan en un troquel; y 2) los punzones superior e inferior, que también sirven como electrodos, comprimen la pieza aplicando una corriente eléctrica de alta energía que al mismo tiempo quema los contaminantes de la superficie y sinteriza los polvos, y forma una pieza densa y sólida en cerca de 15 s. El proceso se ha aplicado a varios metales.

16.4.5 Sinterizado en fase líquida

El sinterizado convencional (sección 16.3.3) es un sinterizado en estado sólido, en el cual el metal se sinteriza a una temperatura por debajo de su punto de fusión. En sistemas que involucran una mezcla de dos polvos metálicos, donde existe una diferencia de temperatura de fusión entre los metales, se usa un tipo alterno de sinterización, llamado sinterizado en fase líquida. En este proceso, se mezclan los dos polvos iniciales y luego se calientan a una temperatura lo suficientemente alta para fundir el metal de más bajo punto de fusión, pero no el otro. El metal fundido moja perfectamente las partículas sólidas, creando una estructura densa con uniones fuertes entre los metales una vez solidificados. Un calentamiento prolongado puede generar la aleación de los metales por una disolución gradual de las partículas sólidas en el metal líquido o la difusión del metal líquido en el sólido, dependiendo de los metales involucrados. En cualquier caso, el producto resultante está completamente densificado (sin poros) y es fuerte. Ejemplos de sistemas que involucran sinterización en fase líquida son: Fe-Cu, W-Cu y Cu-Co [5].

16.5 MATERIALES Y PRODUCTOS PARA METALURGIA DE POLVOS

Las materias primas para el procesamiento en metalurgia de polvos son más costosas que para otros trabajos de metal, debido a la energía adicional requerida para reducir el metal a polvo. Por consiguiente, la metalurgia de polvos solamente es competitiva en ciertos tipos de aplicaciones. En esta sección se identificarán los materiales y productos que parecen más apropiados para la metalurgia de polvos.

16.5.1 Materiales para la metalurgia de polvos

Desde un punto de vista químico, los polvos metálicos se pueden clasificar en elementales y prealeados. Los polvos ***elementales*** consisten en un metal puro y se usan en aplicaciones

donde la alta pureza es importante. Por ejemplo, el hierro puro puede usarse donde importan sus propiedades magnéticas. Los polvos elementales más comunes son de hierro, de aluminio y de cobre.

Los polvos elementales se mezclan también con otros polvos metálicos para producir aleaciones especiales que son difíciles de formular por métodos convencionales. Las herramientas de acero son un ejemplo; la metalurgia de polvos permite combinar ingredientes que son difíciles o imposibles por las técnicas tradicionales de aleación. El uso de mezclas de polvos elementales facilita el procesamiento para formar una aleación, aun cuando no involucre aleaciones especiales. Ya que los polvos son metales puros, no son tan fuertes como los metales prealeados. Por tanto se deforman más fácilmente durante el prensado, así que la densidad y la resistencia fresca son más altas que los compactados prealeados.

En los ***polvos prealeados***, cada partícula es una aleación que tiene la composición química deseada. Los polvos prealeados se usan cuando la aleación no puede formularse mediante la mezcla de polvos elementales; el acero inoxidable es un ejemplo importante. Los polvos prealeados más comunes son ciertas aleaciones de cobre, acero inoxidable y acero de alta velocidad.

Los polvos elementales y prealeados de uso más común en orden aproximado de tonelaje son: 1) el hierro, con mucho el metal más usado en PM, mezclado frecuentemente con grafito para hacer piezas de acero, 2) el aluminio, 3) el cobre y sus aleaciones, 4) el níquel, 5) el acero inoxidable, 6) el acero de alta velocidad y 7) otros materiales de metalurgia de polvos como el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el estaño y los metales preciosos.

16.5.2 Productos de la metalurgia de polvos

La ventaja sustancial de la tecnología de polvos es que las piezas se hacen en forma neta o casi neta; requieren poco o ningún formado adicional después de procesarse en metalurgia de polvos. Algunos de los componentes comúnmente fabricados mediante metalurgia de polvos son engranes, rodamientos, catarinas, sujetadores, contactos eléctricos, herramientas de corte y varias piezas de maquinaria. La producción en grandes cantidades de engranes y rodamientos se adapta particularmente bien a la metalurgia de polvos por dos razones: 1) tienen una forma definida principalmente en dos dimensiones (la superficie superior tiene cierta forma y hay pocas o ninguna forma lateral) y 2) se necesita porosidad en el material para servir como depósito de lubricantes. Mediante la metalurgia de polvos también se pueden hacer piezas más complejas con forma tridimensional, añadiendo operaciones secundarias como maquinado para completar la forma de las piezas prensadas y sinterizadas, y observando ciertos lineamientos de diseño, como los que se reseñan en la siguiente sección.

16.6 CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN METALURGIA DE POLVOS

El uso de técnicas de la metalurgia de polvos es generalmente apropiado para cierta clase de situaciones de producción y diseño de piezas. En esta sección se intenta definir las características de estas aplicaciones donde la metalurgia de polvos es más apropiada. Se presenta primero un sistema de clasificación para piezas de metalurgia de polvos, y luego se ofrecen algunos lineamientos sobre el diseño de los componentes.

16.6.1 Sistema de clasificación de piezas

La Metal Powder Industries Federation (MPIF) define cuatro clases de diseño de piezas de metalurgia de polvos, atendiendo al nivel de dificultad en el prensado convencional. El sistema es útil porque indica alguna de las limitaciones que deben hacerse en las formas

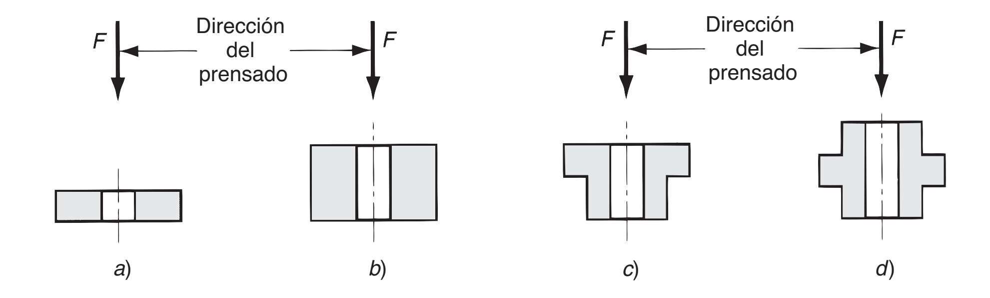


FIGURA 16.16 Cuatro clases de piezas en metalurgia de polvos (vista lateral, la sección transversal es circular): *a*) clase I, formas delgadas simples que se pueden presionar en una dirección; *b*) clase II, formas simples pero más gruesas que requieren presión en dos direcciones; *c*) clase III, dos niveles de espesor presionados en dos direcciones, y *d*) clase IV, múltiples niveles de espesor presionados en dos direcciones, con controles separados para cada nivel a fin de lograr una densificación apropiada a través de la compactación.

cuando se usan los procesamientos convencionales de metalurgia de polvos. Las cuatro clases de piezas se ilustran en la figura 16.16.

16.6.2 Lineamientos para el diseño de piezas en metalurgia de polvos

El sistema de clasificación de la MPIF suministra algunos lineamientos aplicables a la forma de las piezas, apropiada a las técnicas de prensado convencional en metalurgia de polvos. En los siguientes lineamientos se ofrecen sugerencias de diseño adicionales, recopiladas de [2], [10] y [13].

➢ La economía de los procesamientos mediante metalurgia de polvos usualmente requiere grandes cantidades de piezas para justificar el costo del equipo y las herramientas especiales necesarias. Se sugieren cantidades mínimas de 10 000 unidades [13], aun cuando hay excepciones.
➢ La capacidad de fabricar piezas con un nivel controlado de porosidad es una característica única de la metalurgia de polvos. Son posibles porosidades hasta de 50%.
➢ La metalurgia de polvos se puede usar para hacer piezas de metales y aleaciones inusuales, materiales que podrían ser difíciles o imposibles de producir por otros medios.
➢ La forma de la pieza debe permitir su remoción del troquel después del prensado; esto significa en términos generales que la pieza debe tener lados verticales o casi verticales, aunque se pueden hacer escalonados como sugiere el sistema de clasificación de la MPIF (figura 16.16). Deben evitarse características de diseño como muescas y perforaciones laterales como las que se muestran en la figura 16.17. Son permisibles las

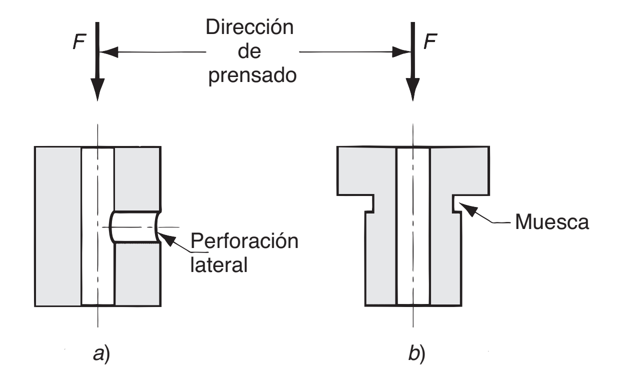


FIGURA 16.17 Formas de las piezas que deben evitarse en metalurgia de polvos, *a*) perforaciones laterales y *b*) muescas laterales. La remoción de la pieza es imposible.

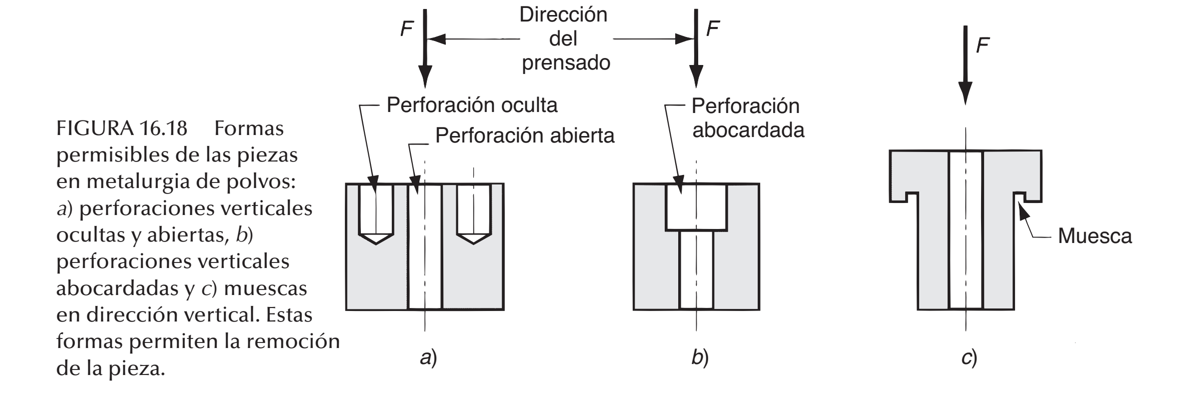


FIGURA 16.18 Formas permisibles de las piezas en metalurgia de polvos: *a*) perforaciones verticales ocultas y abiertas, *b*) perforaciones verticales abocardadas y *c*) muescas en dirección vertical. Estas formas permiten la remoción de la pieza.

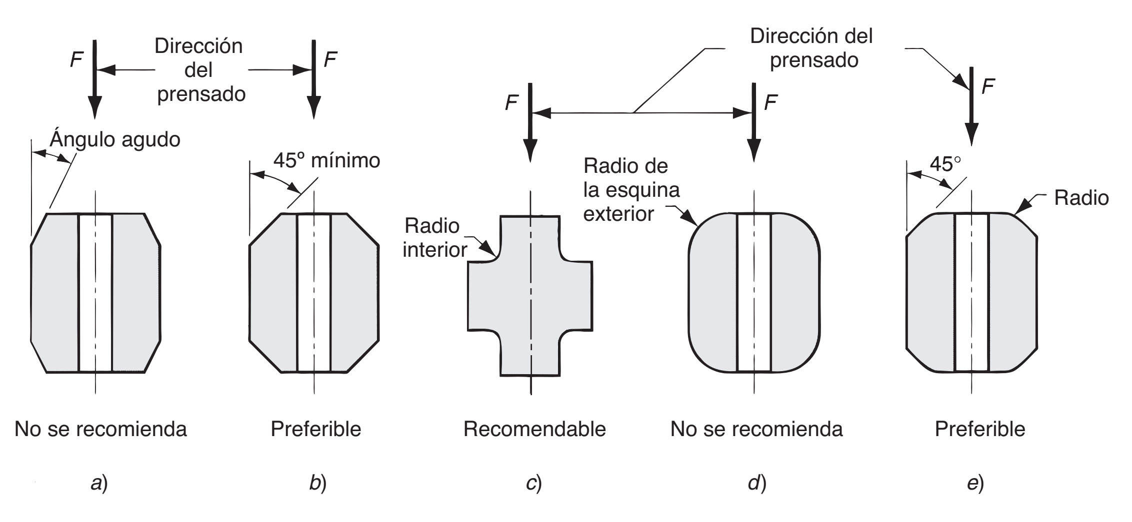


FIGURA 16.19 Se puede lograr chaflanes y esquinas redondeadas, pero deben observarse ciertas reglas: *a*) evitar ángulos agudos del chaflán, *b*) son preferibles ángulos mayores para la rigidez del punzonado, *c*) son deseables los radios interiores pequeños, *d*) los radios completos en las esquinas exteriores son difíciles porque el punzonado es frágil en los bordes de las esquinas, *e*) los problemas en las esquinas exteriores pueden solucionarse combinando radios y chaflanes.

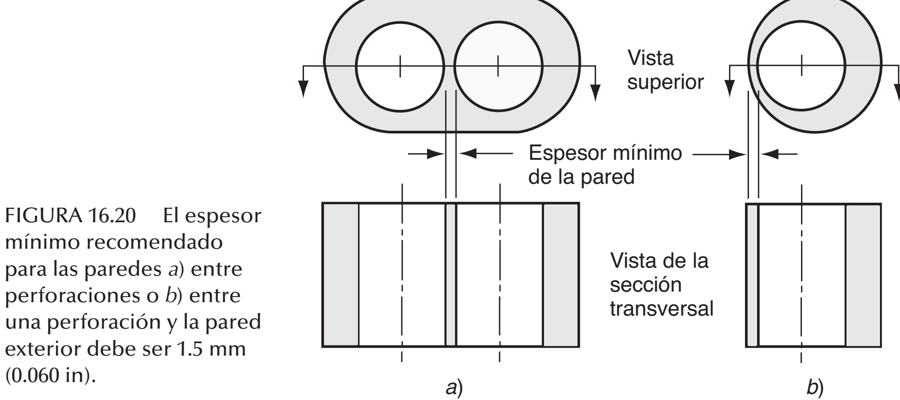


FIGURA 16.20 El espesor mínimo recomendado para las paredes *a*) entre perforaciones o *b*) entre una perforación y la pared exterior debe ser 1.5 mm (0.060 in).

muescas y perforaciones verticales, como las de la figura 16.18, porque no interfieren con la remoción. Las perforaciones verticales pueden hacerse de sección transversal no redonda (por ejemplo, cuadradas o estriadas) sin aumentar significativamente las herramientas o las dificultades de procesamiento.

➢ Las cuerdas roscadas no se pueden fabricar en metalurgia de polvos; si se necesitan, deben maquinarse en la pieza ya tratada por PM.

➢ Los chaflanes y esquinas redondeadas son posibles en el prensado de metalurgia de polvos, como se muestra en la figura 16.19. Cuando los ángulos son muy agudos se encuentran problemas con la rigidez de los punzones.

➢ El espesor de la pared debe tener un mínimo de 1.5 mm (0.060 in) entre dos perforaciones o entre una perforación y la pared exterior de la pieza, como se indica en la figura 16.20. El diámetro mínimo recomendado de la perforación es de 1.5 mm (0.060 in).

REFERENCIAS

[1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L., ***Manufacturing Processes***, 8a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.

[2] Bralla, J. G.(ed.), ***Design form Manufacturability Handbook***, 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[3] Bulger, M., "Metal Injection Molding," ***Advanced Materials & Processes***, marzo de 2005, pp. 39-40.

[4] Dixon, R. H. T. y Clayton, A., ***Powder metallurgy for Engineers***, The Machinery Publishing Co. Ltd., Brighton, U.K., 1971.

[5] German, R. M., ***Powder Metallurgy Science***. 2a. ed., Metal Powder Industries Federation, Princeton, N. J., 1994.

[6] German, R. M., ***Powder Injection Molding***, Metal Powder Industries Federation, Princeton, N. J. 1990.

[7] Johnson, P. K., "P/M Industry Trends in 2005", **Advanced Materials & Processes**, marzo de 2005, pp. 25-28.

[8] ***Metals Handbook***, 9a. ed., vol. 7. ***Powder Metallurgy***. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984.

[9] Pease, L. F., "A Quick Tour of Powder Metallurgy", ***Advanced Materials & Processes,*** marzo de 2005, pp. 36-38.

[10] ***Powder Metallurgy Design Handbook***, Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, 1989.

[11] Schey, J. A., ***Introduction to Manufacturing Processes***, 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.

[12] Waldron, M. B. y Daniell, B. L., ***Sintering***, Heyden, Londres, U. K., 1978.

[13] Wick, C., Benedict, J.T. y Veilleux, R. F. (eds.), ***Tools and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., vol. II, **Forming**. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich. 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

16.1. Mencione algunas razones que explican la importancia comercial de la metalurgia de polvos.

16.2. ¿Cuáles son algunas desventajas de los métodos de metalurgia de polvos?

16.3. ¿Qué significa el número de malla en el cribado de polvos para su clasificación?

16.4. ¿Cuál es la diferencia entre poros abiertos y poros cerrados en los polvos metálicos?

16.5. ¿Qué significa el término razón de aspecto para una partícula metálica?

16.6. ¿Cómo se mide el ángulo de reposo para una cantidad dada de polvo metálico?

16.7. Defina la densidad real y la densidad volumétrica para polvos metálicos.

16.8. ¿Cuáles son los principales métodos para producir polvos metálicos?

16.9. ¿Cuáles son los tres pasos básicos de los procesos de formado convencionales en la metalurgia de polvos?

16.10. ¿Cuál es la diferencia técnica entre mezclado y combinado en la metalurgia de polvos?

16.11. ¿Cuáles son algunos de los ingredientes que se añaden usualmente a los polvos metálicos durante el mezclado o combinado?

16.12. ¿Qué se entiende por el término compactado fresco?

16.13. Describa lo que les pasa a las partículas individuales durante la compactación.

16.14. ¿Cuáles son los tres pasos en el ciclo de sinterizado en metalurgia de polvos?

16.15. ¿Cuáles son algunas razones por las que convienen hornos con atmósfera controlada en el sinterizado?
16.16. ¿Cuáles son las ventajas de la infiltración en la metalurgia de polvos?
16.17. ¿Qué diferencia hay entre moldeo por inyección de polvos y moldeo por inyección metálica?
16.18. ¿Cómo se distingue el prensado isostático del prensado convencional y sinterizado en metalurgia de polvos?
16.19. Describa el sinterizado en fase líquida.
16.20. ¿Cuáles son las dos clases básicas de polvos metálicos desde el punto de vista químico?
16.21. ¿Por qué la metalurgia de polvos es tan apropiada para la producción de engranes y rodamientos?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 19 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

16.1. El tamaño de las partículas que pueden pasar a través de una criba se obtiene por el recíproco del número de malla de la criba: *a*) verdadero o *b*) falso.
16.2. Para un peso dado de polvo metálico, el área superficial total de los polvos se incrementan por (dos respuestas mejores): *a*) mayor tamaño de partícula, *b*) menor tamaño de partícula, *c*) mayor factor de forma o *d*) menor factor de forma.
16.3. Al aumentar el tamaño de partícula, la fricción interparticular *a*) disminuye, *b*) aumenta o *c*) permanece igual.
16.4. ¿Cuál de las siguientes formas de polvo tiende a poseer la menor fricción interparticular? *a*) acicular, *b*) cúbica, *c*) hojuelas, *d*) esférica y *e*) redondeada.
16.5. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta en el contexto de los polvos metálicos? (tres respuestas correctas) *a*) porosidad + factor de empaquetamiento = 1.0, *b*) factor de empaquetamiento = 1/porosidad, *c*) factor de empaquetamiento = 1.0 – porosidad, *d*) factor de empaquetamiento = – porosidad, *e*) factor de empaquetamiento = densidad volumétrica/densidad real?
16.6. ¿Cuál de las siguientes fórmulas tipifica de manera más precisa las temperaturas de sinterizado en la metalurgia de polvos? *a*) 0.5 T_m, *b*) 0.8 T_m, *c*) T_m, donde T_m = temperatura de fundido del metal.
16.7. El reprensado se refiere a una operación de prensado que se usa para comprimir una pieza no sinterizada de un troquel cerrado y lograr así su dimensionado y un mejor acabado de la superficie: *a*) verdadero o *b*) falso.
16.8. ¿A cuál de las siguientes opciones se refiere la impregnación? (dos respuestas son más apropiadas): *a*) llenar los poros de una pieza de metalurgia de polvos con un metal fundido, *b*) colocar polímeros en los poros de una pieza de la metalurgia de polvos, *c*) empapado de aceite por acción de capilaridad en los poros de una pieza de la metalurgia de polvos y *d*) algo que no debe pasar en una fábrica.
16.9. En el prensado isostático, ¿con cuál de los siguientes materiales está hecho típicamente el molde? *a*) caucho, *b*) lámina de metal, *c*) textiles, *d*) polímero termofijo o *e*) acero de herramienta.
16.10. ¿Cuál de los siguientes procesos combina el prensado y el sinterizado de polvos metálicos? (tres respuestas mejores): *a*) prensado isostático caliente, *b*) prensado caliente, *c*) moldeo por inyección de metal, *d*) prensado y sinterizado y *e*) sinterizado por chispas.
16.11. ¿Cuál de las características de diseño dificultaría o imposibilitaría la realización del prensado y sinterizado convencionales? (tres respuestas mejores): *a*) esquinas exteriores redondeadas, *b*) perforaciones laterales, *c*) perforaciones roscadas, *d*) perforaciones verticales abocardadas y *e*) paredes verticales de 1/8 in (3 mm) de espesor.

PROBLEMAS

Caracterización de los polvos en ingeniería

16.1. Una criba con un número de malla 325 tiene alambres con un diámetro de 0.001377 in. Utilizando la ecuación (16.1) determine: *a*) el tamaño máximo de partícula que pasaría a través de la malla de alambre y *b*) la proporción de espacios abiertos en la criba.
16.2. Una criba con número de malla 10 tiene alambres con un diámetro de 0.0213 in. Utilizando la ecuación (16.1), determine: *a*) el tamaño máximo de partícula que pasaría a través de la malla de alambre y *b*) la proporción de espacios abiertos en la criba.

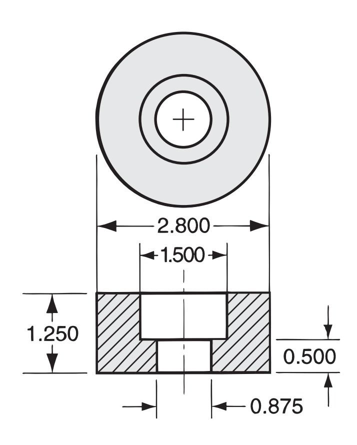


FIGURA P16.13 Pieza para el problema 16.13 (dimensiones en in).

16.3. ¿Cuál es la razón de aspecto de una partícula con forma cúbica?

16.4. Determine el factor de forma para partículas metálicas de las siguientes formas ideales: *a*) esférica, *b*) cúbica, *c*) cilíndrica con una razón de longitud al diámetro de 1:1, *d*) cilíndrica con razón de longitud al diámetro de 2:1 y *e*) hojuela en forma de disco cuya razón de espesor a diámetro es 1:10.

16.5. Un montón de polvo de hierro pesa 2 libras. Las partículas son de forma esférica y todas tienen el mismo diámetro de 0.002 in. *a*) Determine el área superficial total de todas las partículas que estén apiladas. *b*) Si el factor de empaquetamiento es igual a 0.6, determine el volumen de la pila de partículas. Nota: la densidad del hierro es igual a 0.284 lb/in^3.

16.6. Resuelva el problema 16.5, si el diámetro de las partículas es de 0.004 in. Suponga el mismo factor de empaquetamiento.

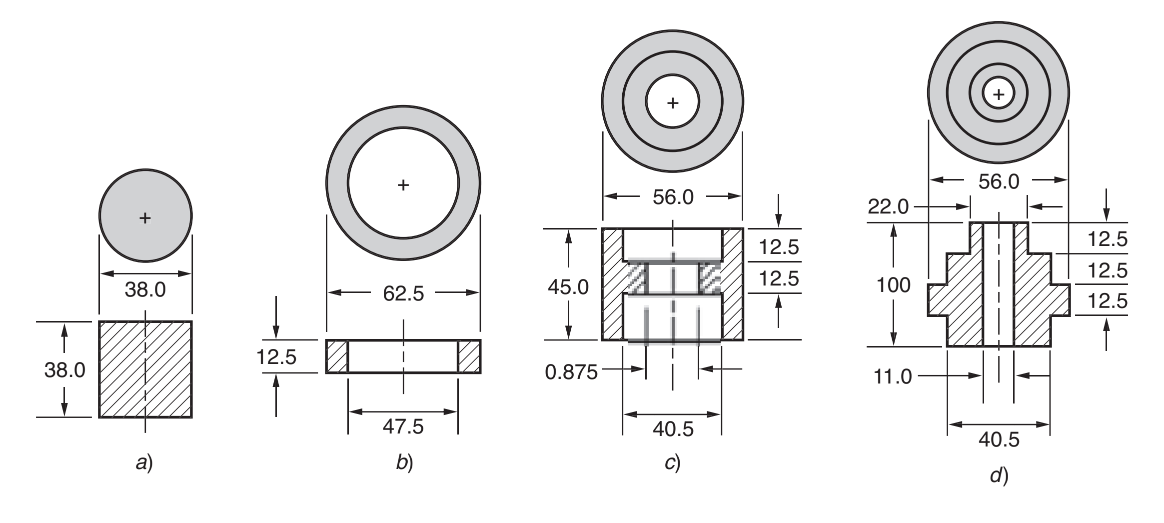
16.7. En el problema 16.5 suponga que el diámetro promedio de la partícula es igual a 0.002 in; sin embargo, los tamaños varían formando una distribución estadística como sigue: 25% en peso de las partículas miden 0.001 in, 50% miden 0.002 in y 25% miden 0.003 in. Dada esta distribución, ¿cuál es área superficial total de todas las partículas en el montón?

16.8. En un cubo sólido de cobre cuyo lado = 1.0 ft se convierte en polvo metálico de forma esférica por atomización con gas, ¿cuál es el porcentaje de incremento en el área superficial total si el diámetro de cada partícula es de 0.004 in? (Suponga que todas las partículas tienen el mismo tamaño).

16.9. En cubo sólido de aluminio, cuyos lados = 1.0 m, se convierte en polvo metálico de forma esférica por atomización con gas. ¿Cuánta superficie se añade por este proceso si el diámetro de la partícula es de 100 micras? (Suponga que todas las partículas tienen el mismo tamaño).

16.10. Dado un volumen grande de polvos metálicos, en el cual todos son perfectamente esféricos y tienen exactamente el mismo diámetro, ¿cuál es el factor de empaquetamiento máximo posible que pueden tener?

FIGURA P16.14 Piezas para el problema 16.14 (dimensiones en milímetros).



Consideraciones de diseño y compactación

16.11. En cierta operación de prensado los polvos metálicos que se le alimentan a un molde abierto tienen un factor de empaquetamiento de 0.5. La operación de prensado reduce el polvo a dos terceras partes de su volumen inicial. En la operación de sinterizado posterior, la contracción asciende a 10% sobre base volumétrica. Dado que éstos son los únicos factores que afectan la estructura de la pieza terminada, determine su porosidad final.

16.12. Se va a prensar un rodamiento de forma simple a partir de polvos de bronce usando una presión de compactación de 207 MPa. El diámetro exterior es de 44 mm, el diámetro interior de 22 mm y la longitud del rodamiento es de 25 mm. ¿Cuál es el tonelaje requerido de la prensa para desempeñar esta operación?

16.13. La pieza que se muestra en la figura P16.13 se va a prensar a partir de polvos de hierro, usando una presión de compactación de 75 000 lb/in^2. Las dimensiones están en in. Determine *a*) la dirección más apropiada del prensado, *b*) el tonelaje requerido de la prensa para desempeñar esta operación y *c*) el peso final de la pieza si la porosidad es de 10%. Suponga que la contracción durante el sinterizado se puede despreciar.

16.14. Indique a qué clase de piezas de metalurgia de polvos pertenece cada uno de los cuatro dibujos que aparecen en la figura P16.14; indique también si la pieza debe ser prensada en una o dos direcciones y cuántos niveles de control de prensa se requerirán. Las dimensiones están en milímetros.

17 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS Y CERMETS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En el capítulo 7 se analizó que las cerámicas se dividen en tres categorías: 1) cerámicas tradicionales, 2) nuevos productos de cerámica y 3) vidrios. El procesamiento del vidrio involucra principalmente solidificación y se estudió en el capítulo 12. En este capítulo se considerarán los métodos de procesamiento particulado que se usan para las cerámicas nuevas y las tradicionales. También se estudiarán el procesamiento de los compuestos matriciales metálicos y los cerámicos.

Las cerámicas tradicionales se hacen a partir de minerales que se encuentran en la naturaleza e incluyen alfarería, porcelana, ladrillos y cemento. Las nuevas cerámicas se hacen a partir de materias primas producidas sintéticamente y cubren un amplio espectro de productos, como herramientas de corte, huesos artificiales, combustibles nucleares y sustratos de circuitos electrónicos. El material inicial para todos estos artículos es polvo. En el caso de las cerámicas tradicionales, los polvos se mezclan usualmente con agua para aglutinar temporalmente las partículas y lograr una consistencia adecuada para darles forma. En las nuevas cerámicas se usan otras sustancias aglutinantes durante el formado. Las piezas frescas se sinterizan después de ser formadas. En cerámica se llama ***cocimiento***, pero su función es la misma que en metalurgia de polvos: efectuar una reacción de estado sólido que una los materiales en una masa sólida y dura.

Los métodos de procesamiento que se revisarán en este capítulo son importantes tecnológica y comercialmente porque en la práctica todos los productos cerámicos se for-

man por estos métodos (excepto, por supuesto, los productos de vidrio). La secuencia de manufactura es muy similar entre las cerámicas tradicionales y las nuevas cerámicas, debido a que la forma del material inicial es la misma: polvo. Sin embargo, los métodos de procesamiento para las dos categorías son bastante diferentes, por lo que se analizarán en forma individual.

17.1 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS TRADICIONALES

En esta sección se revisará la tecnología de producción de cerámicas tradicionales, como alfarería, gres y otras lozas de mesa, ladrillos, azulejos y cerámica refractaria. Las ruedas de esmeril se producen también por los mismos métodos básicos. Lo que estos productos tienen en común es que sus materias primas consisten en silicatos cerámicos (arcillas). La secuencia de procesamiento de la mayoría de las cerámicas tradicionales incluye los pasos ilustrados en la figura 17.1.

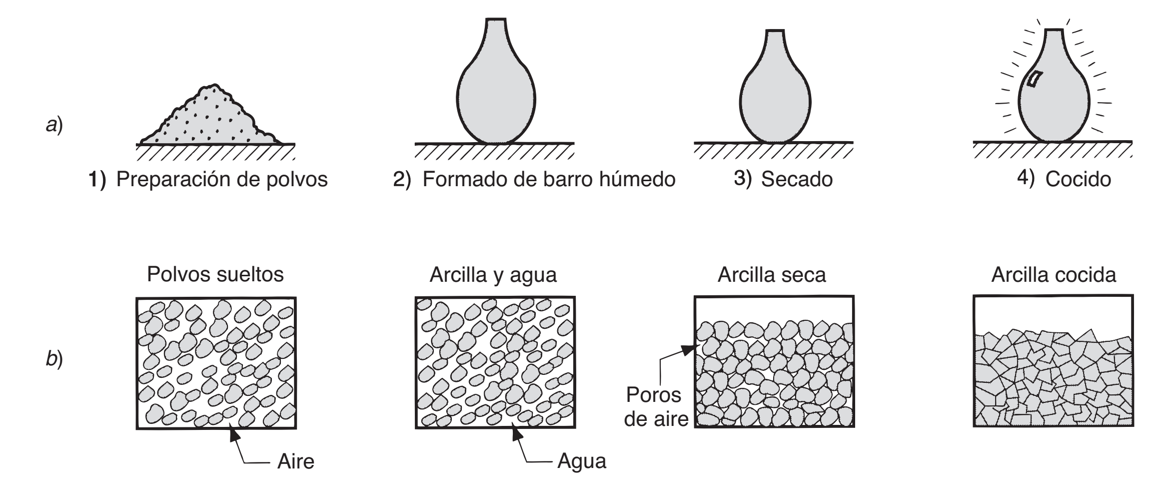
17.1.1 Preparación de las materias primas

Los procesos de formado de los productos cerámicos tradicionales requieren que el material inicial tenga la forma de una pasta plástica, compuesta de finos polvos cerámicos mezclados con agua; su consistencia determina la facilidad para formar el material y la calidad del producto final. Las materias primas cerámicas se encuentran generalmente en la naturaleza como terrones rocosos, y su reducción a polvo es el propósito de los pasos de preparación en el procesamiento cerámico.

Las técnicas para reducir el tamaño de las partículas en el procesamiento de las cerámicas aportan varias formas de energía mecánica, como impacto, compresión y frotamiento. El término ***pulverización*** se usa para estas técnicas, las cuales son más efectivas en materiales frágiles, incluidos el cemento, las menas metálicas y los metales frágiles. Se distinguen dos tipos generales de operaciones de pulverización: el triturado y la molienda.

El ***triturado*** se refiere a la ruptura de grandes trozos provenientes de la mina en tamaños más pequeños para su reducción posterior. Se puede requerir varias etapas (por ejemplo, triturado primario y triturado secundario), y la relación de reducción en cada etapa

FIGURA 17.1 Pasos usuales en el procesamiento tradicional de las cerámicas: 1) preparación de materias primas, 2) formado, 3) secado y 4) cocimiento. El inciso *a*) muestra la pieza de trabajo durante la secuencia, mientras que el inciso *b*) muestra la condición de los polvos.



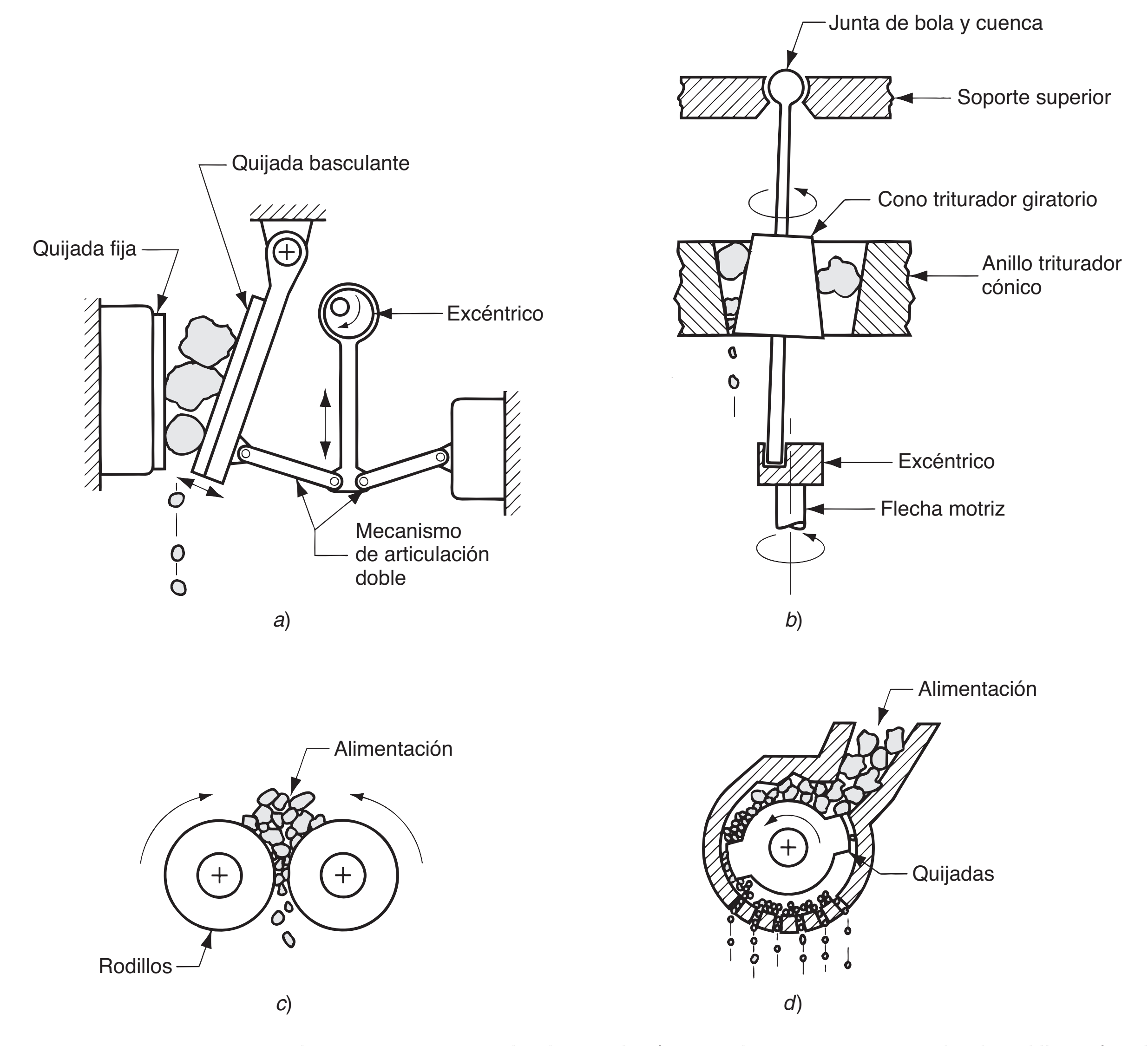


FIGURA 17.2 Operaciones de trituración: *a*) triturador de quijadas, *b*) triturador giratorio, *c*) triturador de rodillos y *d*) molino de martillos.

puede ser del orden de 3 a 6. El triturado de minerales se realiza por compresión contra superficies rígidas o por impacto contra superficies rígidas con movimiento restringido [1]. El equipo que se usa para realizar el triturado es de varios tipos. En la figura 17.2 se muestran algunos equipos utilizados para llevarlo a cabo: *a*) trituradores de quijadas, en los cuales una quijada grande se mueve hacia delante y hacia atrás para triturar los terrones contra una superficie dura y rígida; *b*) trituradores giratorios, que usan un cono giratorio para comprimir los trozos contra una superficie dura y rígida, *c*) trituradores de rodillos, en los cuales los trozos de cerámica se aprietan entre tambores rotatorios; y *d*) molinos de martillos, que usan martillos rotatorios para golpear el material y romper los trozos.

La ***molienda***, en este contexto, se refiere a la operación de reducir las piezas pequeñas después del triturado a polvos finos. La molienda se realiza por abrasión e impacto del mineral triturado por el libre movimiento de un medio duro y suelto, como bolas, piedras o barras [1]. En la figura 17.3 se ilustran algunos ejemplos de molienda: *a*) molino de balines, *b*) molino de rodillos y *c*) molienda por impacto.

Un ***molino de balines*** contiene esferas duras mezcladas con el material a pulverizar, que giran dentro de un recipiente cilíndrico grande. El movimiento arrastra a los balines y

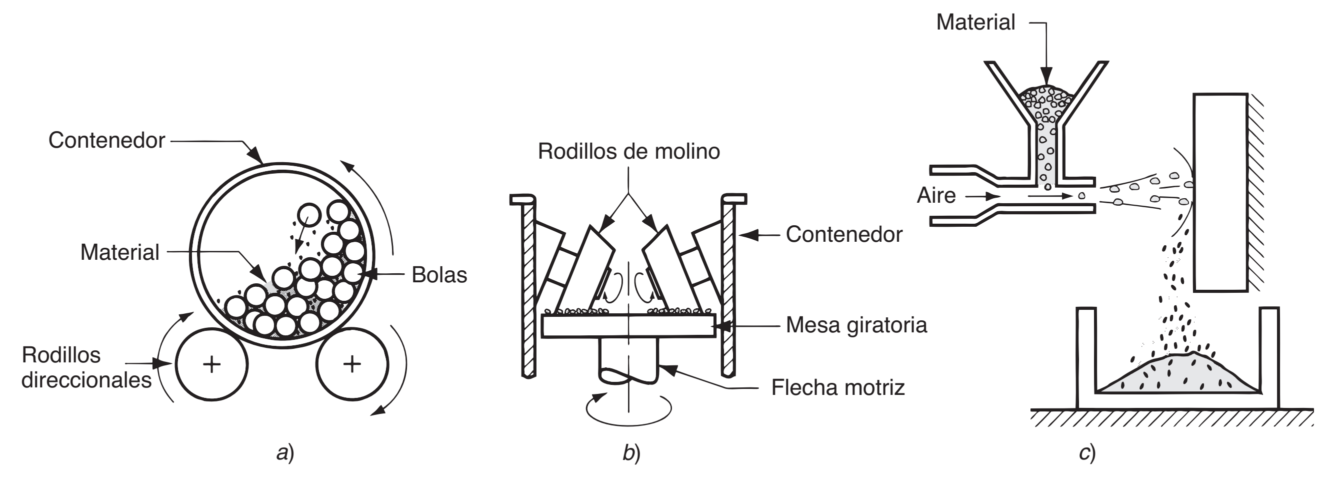


FIGURA 17.3 Métodos mecánicos para producir polvos cerámicos: *a*) molino de balines, *b*) molino de rodillos y *c*) molienda por impacto.

el material hacia arriba en la pared del recipiente y los hace caer para realizar la molienda por una combinación de impacto y frotamiento. Estas operaciones frecuentemente añaden agua a la mezcla, de manera que se forme una pasta aguada. En un ***molino de rodillos***, el material se comprime contra la mesa horizontal del molino mediante rodillos que giran sobre la superficie de la mesa. Aunque no se muestra claramente en el diagrama, la presión de los rodillos sobre la mesa se regula por resortes mecánicos o medios hidroneumáticos. En la ***molienda por impacto***, que parece usarse poco, las partículas del material se proyectan contra una superficie plana dura, ya sea por corriente de aire a alta velocidad o mediante un chorro de una pasta muy fluida a alta velocidad. El impacto fractura las piezas en partículas más pequeñas.

La pasta plástica requerida para el formado consiste en polvos cerámicos y agua. La arcilla es el ingrediente principal de la pasta, ya que tiene características ideales de formado. Mientras más agua tenga la mezcla, la arcilla será más plástica y fácil de formar. Sin embargo, cuando se seca y se cuece la pieza formada, se presenta la contracción que puede causar grietas en el producto. Para evitar este problema se añaden a la pasta otras materias primas cerámicas que no se encogen al secarse y quemarse (o al cocerse), con frecuencia en cantidades significativas. También se pueden añadir otros componentes que tienen funciones especiales. De esta manera, los ingredientes de la pasta cerámica se pueden dividir en las siguientes tres categorías [3]: 1) arcilla, que proporciona la consistencia y plasticidad requeridas para el formado, 2) materias primas no plásticas, tales como alúmina y sílice, que no se encogen durante el secado y el cocido, pero desafortunadamente reducen la plasticidad en la mezcla durante el formado y 3) otros ingredientes, tales como fundentes, que vitrifican durante el cocimiento y promueven la sinterización del material cerámico (feldespato) y agentes humectantes que mejoran la mezcla de los ingredientes.

Estos ingredientes se mezclan perfectamente por vía húmeda o seca. Además de su función de molienda, el molino de balines sirve para este propósito. También deben ajustarse las cantidades apropiadas de polvo y agua en la pasta, de manera que se pueda aumentar o disminuir la humedad, dependiendo de la condición anterior de la pasta y de la consistencia final deseada.

17.1.2 Procesos de formado

Las proporciones óptimas de polvo y agua dependen del proceso de formado que se usa. Algunos procesos de formado requieren alta fluidez; otros actúan sobre una composición que tiene bajo contenido de agua. Con cerca de 50% de agua, la mezcla es una pasta aguada que fluye como un líquido. Al reducirse el contenido de agua, se hace necesario

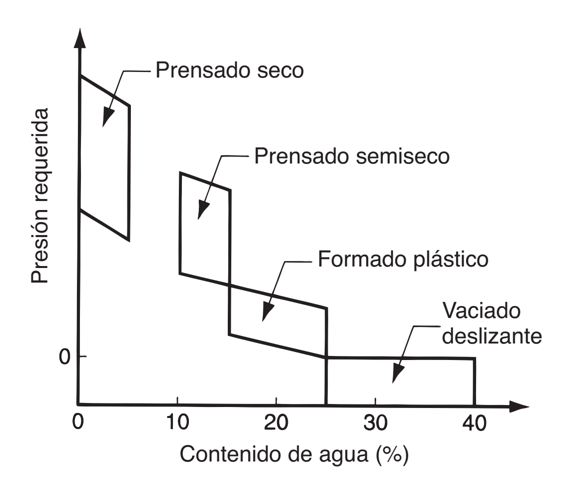


FIGURA 17.4 Cuatro categorías de procesos de formado para cerámicas tradicionales comparadas con el contenido de agua y la presión requerida para formar la arcilla.

aumentar la presión sobre la pasta para producir un flujo similar. Por tanto, los procesos de formado pueden dividirse con base en la consistencia de la mezcla: 1) fundición o vaciado deslizante, en la cual la mezcla es ligera con 25 a 40% de agua; 2) métodos de formado plástico, en los cuales se forma la arcilla en condición plástica con 15 a 25% de agua; 3) prensado semiseco, en el cual la arcilla está húmeda (10 a 15% de agua), pero posee baja plasticidad; y 4) prensado seco, en el cual la arcilla está básicamente seca, contiene menos de 5% de agua. La arcilla seca no tiene plasticidad. Las cuatro categorías se representan en la gráfica de la figura 17.4, donde se comparan estas categorías con la condición de la arcilla que se usa como material inicial. Cada categoría incluye varios procesos diferentes de formado.

Fundición o vaciado deslizante El vaciado deslizante se usa en metalurgia de polvos, pero su aplicación en cerámica es mucho más común. En este método se vacía una suspensión de polvos cerámicos en agua, llamada ***pasta líquida***, dentro de un molde poroso de yeso ($CaSO_4$–$2H_2O$) donde el agua de la mezcla es absorbida de manera gradual por el yeso y se forma una capa de arcilla firme en la superficie del molde. La composición de la pasta líquida es típicamente de 25 a 40% de agua, y el remanente es arcilla mezclada de manera frecuente con otros ingredientes. Debe ser lo suficientemente fluida para penetrar en los resquicios de la cavidad del molde, pero también es conveniente que el contenido de agua sea bajo para lograr mayores velocidades de producción. El vaciado deslizante tiene dos variantes principales: 1) vaciado drenado y 2) vaciado sólido. En ***el vaciado drenado***, que es el proceso tradicional, el molde se invierte para drenar el exceso de pasta líquida después de que se ha formado la capa semisólida, dejando así una parte hueca en el molde; éste se abre después y se remueve la parte. La secuencia es muy similar a la fundición hueca de metales y se ilustra en la figura 17.5. Ésta se usa para hacer jarras de té, vasos,

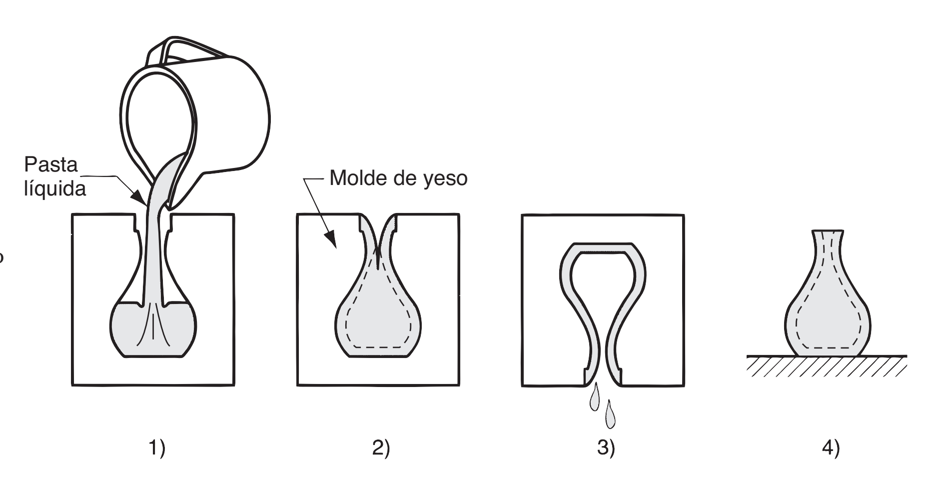


FIGURA 17.5 Secuencia de los pasos en el vaciado drenado, una forma de vaciado deslizante: 1) se vacía la pasta líquida en la cavidad del molde, 2) elagua es absorbida por el molde de yeso para formar una capa firme, 3) el exceso de pasta líquida se vacía afuera y 4) se retira la parte del molde y se recorta.

objetos de arte y otros productos huecos de servicio. En el ***vaciado sólido***, que se usa para producir productos sólidos, se da el tiempo suficiente para que el cuerpo entero se vuelva firme. El molde debe llenarse periódicamente con pasta líquida adicional para compensar la contracción debida a la absorción de agua.

Formado plástico Esta categoría incluye varios métodos manuales y mecanizados. Todos ellos requieren que la mezcla inicial tenga consistencia plástica, lo cual se logra generalmente con un contenido de agua de 15 a 25%. Para los métodos manuales se usan generalmente arcillas en el límite superior del rango, que constituyen un material más fácil de formar; sin embargo, esto viene acompañado de mayor contracción en el secado. Los métodos mecanizados emplean por lo general mezclas con menor contenido de agua y por tanto la arcilla inicial es más espesa.

Aunque los métodos manuales de formado se remontan a miles de años atrás, actualmente los siguen usando hábiles artesanos ya sea para producción o para obras de arte. El ***modelado a mano*** involucra la creación del producto cerámico por manipulación de la masa de arcilla plástica a fin de darle la forma deseada. Además de las piezas de arte, se hacen por este método los patrones para los moldes de yeso en el vaciado deslizante. El ***vaciado o moldeado a mano*** es un método similar, pero se utiliza un molde o forma para determinar las partes de la configuración geométrica. El ***torneado a mano*** sobre un torno de alfarero es otro refinamiento de los métodos artesanales. El ***torno de alfarero*** es una mesa redonda que gira en una flecha vertical accionada por un motor o por un pedal. Los productos cerámicos de sección transversal circular pueden formarse en el torno de alfarero usando algunas veces un molde que proporciona la forma interna.

Estrictamente hablando, el uso del torno de alfarero accionado con motor es un método mecanizado. Sin embargo, la mayoría de los métodos mecanizados de formación de arcilla se caracterizan por mucha menor participación manual que el método de torneado manual descrito. Estos métodos más mecanizados incluyen el torneado ligero, el prensado plástico y la extrusión. El ***torneado ligero*** es una extensión del método del alfarero, en el cual el modelado a mano se remplaza por técnicas mecanizadas. Se usa para producir grandes cantidades de artículos idénticos, como platos y tazones para uso doméstico. Aunque hay variantes en las herramientas y métodos usados, con diferentes niveles de automatización y refinamiento de los procesos básicos, en la figura 17.6 se describe la secuencia típica: 1) un pedazo de arcilla húmeda se coloca en un molde convexo; 2) una herramienta de formado presiona contra el pedazo para generar la forma inicial aproximada. La operación se llama ***tejuelado*** y la pieza de trabajo creada se llama ***tejuela***; y 3) una herramienta plantilladora calentada imparte el contorno final en la superficie durante la rotación de la pieza de trabajo. La razón para calentar la herramienta es producir vapor de la arcilla húmeda, lo cual evita la adherencia. Estrictamente relacionado con el torneado ligero, es el ***moldeo al torno con estirado***, por medio del cual la forma del molde básico es cóncava en vez de convexa [7]. En ambos procesos se usa algunas veces, en lugar de la plantilla, una herramienta rodante que forma la arcilla por rodamiento, evitando la necesidad de tejuelear el pedazo inicial.

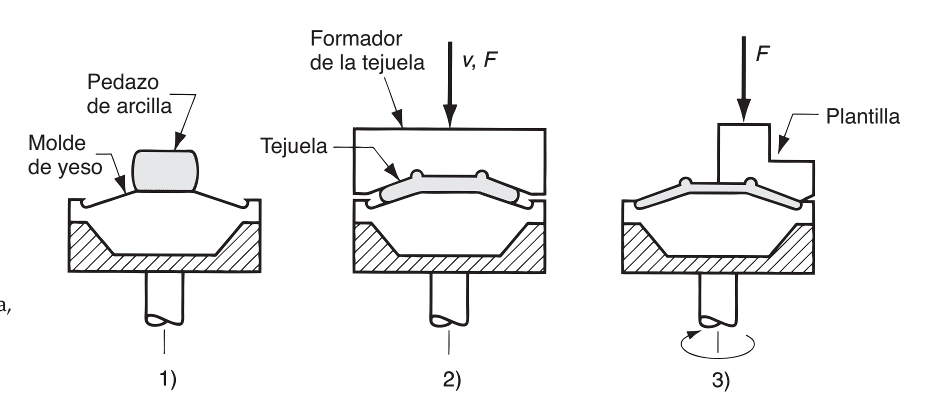


FIGURA 17.6 Secuencia del torneado ligero: 1) un pedazo de arcilla húmeda se coloca en un molde convexo, 2) tejueleado y 3) una plantilla imparte la forma final al producto. Los símbolos v y F indican movimiento (v = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

El ***prensado plástico*** es un proceso de formación en el cual el pedazo de arcilla plástica se prensa entre un molde inferior y otro superior contenidos en un arillo metálico. Los moldes se hacen de un material poroso como yeso; así, al aplicar vacío detrás de los moldes se remueve la humedad de la arcilla. Las secciones del molde se abren entonces, usando presión de aire positiva para prevenir la adherencia de la pieza en el molde. El prensado plástico alcanza producciones más altas que el torneado y no se limita a piezas de simetría radial.

La ***extrusión*** se usa en el procesamiento cerámico para producir secciones largas de sección transversal uniforme que se cortan a la longitud de pieza requerida. El equipo de extrusión utiliza una acción tipo tornillo que ayuda a mezclar la arcilla y a empujar el material plástico a través de la abertura del troquel. Esta secuencia de producción se usa ampliamente para hacer tabiques huecos, losetas, tubos de drenado, tubería en general y aislantes. Se usa también para hacer pedazos de barro inicial para otros procesos cerámicos, como torneado ligero y prensado plástico.

Prensado semiseco En el prensado semiseco las proporciones de agua en la arcilla inicial están típicamente en el rango de 10 a 15%. Esta proporción produce una baja plasticidad que impide el uso de métodos de formado plástico, los cuales requieren una arcilla con mayor plasticidad. Los procesos semisecos usan alta presión para superar la baja plasticidad del material y forzado dentro de la cavidad de un troquel, tal como se muestra en la figura 17.7. Con frecuencia se forma rebaba debido al exceso de barro que se introduce entre las secciones del troquel.

Prensado seco La diferencia principal entre el prensado semiseco y el prensado seco es el contenido de humedad del material inicial. El contenido de humedad de la arcilla inicial en el prensado seco está típicamente por debajo de 5%. Generalmente se agregan aglutinantes a la mezcla de polvos para proporcionar suficiente resistencia a la pieza prensada para su manejo subsiguiente. También se añaden lubricantes para prevenir que la pieza se pegue al dado durante el prensado y la expulsión. Debido a que la arcilla seca no tiene plasticidad y es muy abrasiva, el diseño del troquel y los procedimientos de operación son diferentes al prensado semiseco. Los troqueles se hacen de acero para herramienta endurecido o carburo de tungsteno cementado para reducir el desgaste. Como la arcilla seca no fluye durante el prensado, la forma de la pieza es relativamente simple, por lo que se debe agregar y distribuir en el troquel la cantidad correcta de polvo inicial. No se forman rebabas en el prensado seco y no ocurre contracción de secado, así que el tiempo de

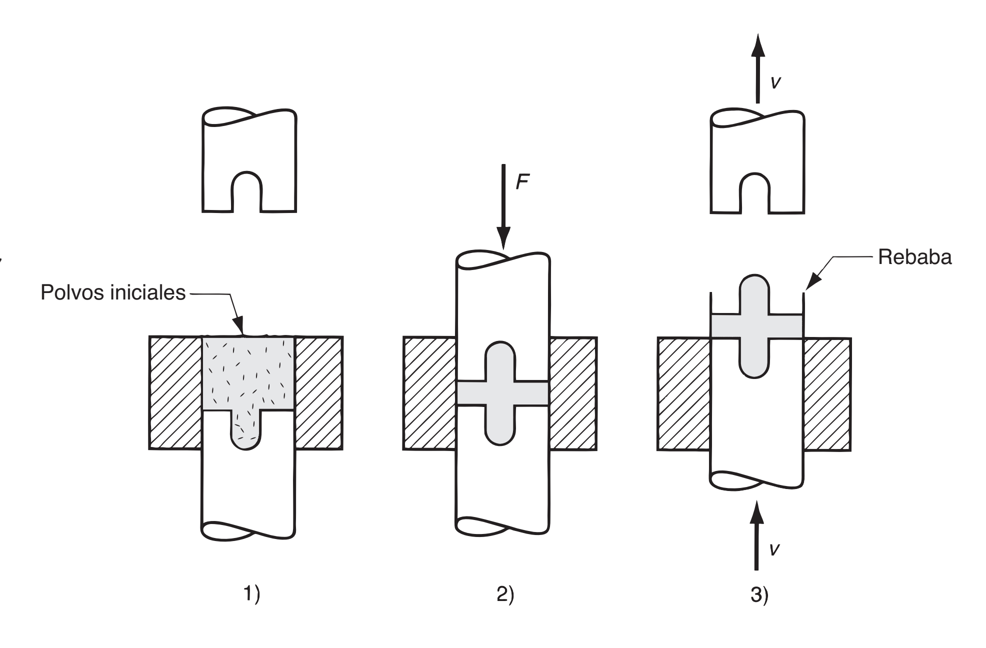


FIGURA 17.7 Prensado semiseco: 1) depósito de polvo húmedo en la cavidad del troquel, 2) prensado y 3) apertura del troquel y expulsión de la pieza. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento (v = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

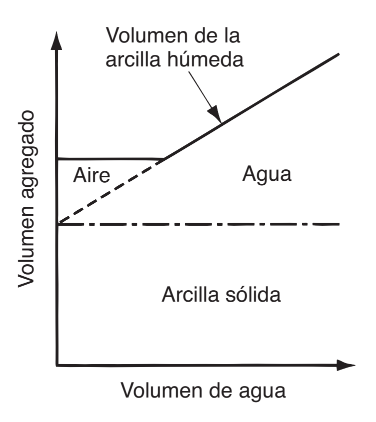


FIGURA 17.8 Volumen de la arcilla como una función del contenido de agua. La relación que se muestra aquí es típica; varía para diferentes composiciones de la arcilla.

secado se elimina, lográndose una buena precisión en las dimensiones del producto final. La secuencia del proceso en el prensado seco es similar a la del prensado semiseco. Los productos típicos incluyen azulejos para baño, aisladores eléctricos y ladrillos refractarios.

17.1.3 Secado

El agua juega un papel importante en la mayoría de los procesos tradicionales de formado cerámico. Pero en adelante ya no tiene ningún objeto y debe removerse del cuerpo de la pieza antes de cocerla. La contracción es un problema durante este paso porque el agua aporta volumen a la pieza y cuando se retira, el volumen se reduce. El efecto se puede ver en la figura 17.8. Al añadir agua inicialmente a la arcilla seca, ésta remplaza simplemente al aire de los poros entre los granos cerámicos y no hay cambio de volumen. Al incrementarse el contenido de agua por arriba de cierto punto, los granos empiezan a separarse y el volumen aumenta, lo que da por resultado una arcilla húmeda que tiene plasticidad y facilidad de formado. Al aumentar el contenido de agua, la mezcla se convierte a la larga en una suspensión líquida de partículas de arcilla en agua.

El proceso inverso ocurre en el secado. Al remover agua de la arcilla húmeda, el volumen de la pieza se contrae. El proceso de secado ocurre en dos etapas, como se describe en la figura 17.9. En la primera etapa, la velocidad de secado es rápida y constante, debido a que el agua de la superficie de la arcilla se evapora en el aire circundante y el agua interior emigra, por acción capilar, hacia la superficie para remplazarla. Durante esta etapa ocurre la contracción, con el riesgo asociado de deformación y agrietamiento debido a las variaciones del secado en diferentes secciones de la pieza. En la segunda etapa de secado, el contenido de humedad se ha reducido hasta que los granos cerámicos han quedado en

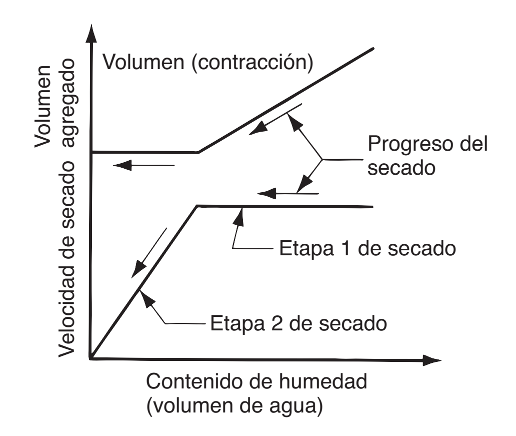


FIGURA 17.9 Curva de velocidad de secado típica asociada a una reducción de volumen (contracción por secado) para un cuerpo cerámico. La velocidad de secado en la segunda etapa se muestra aquí como una línea recta (disminución constante de la velocidad en función del contenido de agua); la función se muestra en la literatura de varias formas, cóncava o convexa [3], [7].

contacto, y ocurre poca o ninguna contracción. El proceso de secado se hace más lento, como se puede ver en la gráfica de la velocidad decreciente.

En producción, el secado se realiza de manera usual en cámaras donde se controla la temperatura y la humedad para lograr el programa apropiado de secado. Debe tenerse cuidado de no remover demasiado rápido el agua de la pieza, para evitar que se formen altos gradientes de humedad, haciendo el material más propenso a las grietas. El calentamiento se hace normalmente por una combinación de convección y radiación usando fuentes infrarrojas. Los tiempos típicos de secado van desde 15 minutos para secciones delgadas hasta varios días para secciones muy gruesas.

17.1.4 Cocimiento (sinterizado)

Después del formado, pero antes del cocimiento, se dice que la pieza cerámica está ***fresca*** (el mismo término que en la metalurgia de polvos), lo cual significa que no está completamente procesada o tratada. La pieza fresca carece de dureza y resistencia, debe cocerse para fijar la forma de la pieza y lograr dureza y resistencia en el producto final. El ***cocimiento*** es el proceso de tratamiento térmico que sinteriza al material cerámico y se realiza en un ***horno cerámico***. En el ***sinterizado*** se desarrollan uniones entre los granos cerámicos y esto va acompañado de densificación y reducción de porosidad. Por tanto, ocurre una nueva contracción en el material policristalino, además de la que ya ha ocurrido en el secado. La sinterización en cerámica es básicamente el mismo mecanismo que en la metalurgia de polvos. En el cocimiento de la cerámica tradicional pueden ocurrir ciertas reacciones químicas entre los componentes de la mezcla y formarse también una fase vítrea entre los cristales, la cual actúa como aglutinante. Ambos fenómenos dependen de la composición química del material cerámico y de las temperaturas de cocimiento que se usan.

Las piezas de cerámica no glaseadas se cuecen solamente una vez; los productos glaseados se cuecen dos veces. El ***glaseado*** se refiere a la aplicación de un recubrimiento cerámico en la superficie para hacer las piezas más impermeables al agua y mejorar su apariencia (sección 7.2.2). La secuencia de procesamiento usual de los artículos glaseados es: 1) cocimiento de los artículos antes del glaseado para endurecer el cuerpo de la pieza, 2) aplicar el glaseado y 3) cocer la pieza una segunda vez para endurecer el glaseado.

17.2 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS NUEVAS

La mayoría de las cerámicas tradicionales se basa en la arcilla (barro), que posee la capacidad única de adquirir plasticidad cuando se mezcla con agua, y dureza cuando se seca y se cuece. La arcilla consta de varios compuestos de silicato hidratado de aluminio, mezclados usualmente con otros materiales cerámicos, para formar una composición química más bien compleja. Las cerámicas nuevas (sección 7.3) se basan en compuestos químicos más simples, como óxidos, carburos y nitruros. Estos materiales no poseen la plasticidad y facilidad de formado de las arcillas tradicionales cuando se mezclan con agua. Por consiguiente, los polvos deben combinarse con otros ingredientes para lograr la plasticidad y otras propiedades convenientes durante el formado y aplicar así los métodos convencionales. Las nuevas cerámicas se diseñan generalmente para aplicaciones que requieren alta resistencia, dureza y otras propiedades que no se encuentran en los materiales cerámicos tradicionales. Estos requerimientos motivaron la introducción de varias técnicas nuevas de procesamiento no usadas anteriormente en las cerámicas tradicionales.

La secuencia de manufactura para las nuevas cerámicas se puede resumir en los siguientes pasos: 1) preparación de materiales iniciales, 2) formado, 3) sinterizado y 4) acabado. Si bien la secuencia es casi la misma para las cerámicas tradicionales, los detalles son frecuentemente muy diferentes, como se verá a continuación.

17.2.1 Preparación de materiales iniciales

Como la resistencia que se especifica para estos materiales es generalmente mucho más grande que para las cerámicas tradicionales, los polvos iniciales deben ser más homogéneos en tamaño y composición, y los tamaños de partícula deben ser menores (la resistencia de los productos cerámicos resultantes es inversamente proporcional al tamaño de los granos). Por tanto, se requiere un mayor control de polvos iniciales. La preparación de los polvos incluye métodos mecánicos y químicos. Los métodos mecánicos constan de las mismas operaciones de molienda que se llevan a cabo en el molino de balines utilizado con las cerámicas tradicionales. La dificultad con estos métodos es que las partículas cerámicas se contaminan con el material de los balines y paredes del molino. Esto compromete la pureza de los polvos cerámicos y como resultado aparecen grietas microscópicas que reducen la resistencia del producto final.

Se usan dos métodos químicos para lograr mayor homogeneidad en los polvos de los nuevos cerámicos: 1) secado por congelación y 2) precipitación de una solución. En ***secado por congelación***, las sales de un producto químico inicial apropiado se disuelven en agua y la solución se rocía para formar gotas pequeñas que son rápidamente congeladas. Después, se remueve la humedad de las gotas en una cámara de vacío; la sal resultante secada por congelación se descompone por calentamiento para formar polvos cerámicos. El secado por congelación no es aplicable a todos los cerámicos, debido a que en algunos casos no es posible identificar un material inicial soluble en agua.

La ***precipitación de una solución*** es otro método de preparación que se usa para las nuevas cerámicas. En el proceso típico, el compuesto cerámico deseado se disuelve a partir del mineral inicial, permitiendo filtrar las impurezas. Entonces se precipita un compuesto intermedio de la solución, que se convierte en el compuesto deseado por calentamiento. Un ejemplo del método de precipitación es el ***proceso Bayer*** para producir alúmina de alta pureza (se usa también en la producción de aluminio). En este proceso el óxido de aluminio se disuelve del material llamado bauxita, para remover los compuestos de hierro y otras impurezas. Luego se precipita el hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$) de la solución y se reduce a Al_2O_3 por calentamiento.

La preparación posterior de polvos incluye la clasificación por tamaños y el mezclado antes de darles forma. Se requieren polvos muy finos para las aplicaciones de las nuevas cerámicas, por lo que se deben separar los granos y clasificarlos de acuerdo con su tamaño. Se requiere también el mezclado total de las partículas para evitar segregación, especialmente cuando se combinan diferentes polvos cerámicos.

Frecuentemente se combinan varios aditivos con los polvos iniciales, por lo general en pequeñas cantidades. Estos aditivos incluyen 1) ***plastificantes***, para mejorar la plasticidad y facilidad de trabajo; 2) ***aglutinantes***, para unir las partículas cerámicas en una masa sólida en el producto final, 3) ***agentes humectantes***, para mejorar el mezclado; 4) ***desfloculantes***, que ayudan a prevenir la aglomeración y la unión prematura de los polvos y 5) ***lubricantes***, para reducir la fricción entre los granos cerámicos durante el formado y para reducir la adherencia cuando se retira la pieza del molde.

17.2.2 Formado

Muchos de los procesos de formado para las nuevas cerámicas han sido tomados de la metalurgia de polvos y de la cerámica tradicional. Los métodos de prensado y sinterizado analizados en la sección 16.3 han sido adaptados para los nuevos materiales cerámicos. Se han usado algunas de las técnicas de formado de las cerámicas tradicionales (sección 17.1.2) para formar las nuevas cerámicas, incluido el vaciado deslizante, la extrusión y el prensado seco. Los procesos que describiremos a continuación no se relacionan normalmente con el formado de cerámicas tradicionales, aunque varios de ellos se asocian con la metalurgia de polvos.

Prensado caliente El prensado caliente es similar al prensado seco (sección 17.1.2), excepto porque el proceso se lleva a cabo a temperaturas elevadas; así el sinterizado del pro-

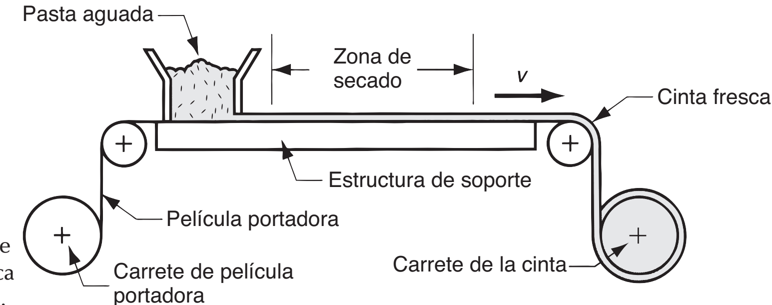


FIGURA 17.10 Proceso de bisturí que se usa para fabricar láminas delgadas de cerámica. El símbolo *v* indica movimiento (*v* = velocidad).

ducto se realiza simultáneamente con el prensado. Esto elimina la necesidad de un paso de cocimiento adicional en la secuencia. Se obtienen densidades más altas y granos de tamaño más fino, pero la vida del troquel se reduce por la abrasión de las partículas calientes contra la superficie del troquel.

Prensado isostático El prensado isostático de las cerámicas es el mismo proceso que se usa en la metalurgia de polvos (sección 16.4.1). Usa presión hidrostática para compactar los polvos cerámicos en todas direcciones, evitando la falta de uniformidad del producto final, problema que se observa frecuentemente en los métodos de prensado uniaxial tradicional.

Procesos de bisturí Este proceso se usa para hacer láminas delgadas de material cerámico. Una aplicación común son las láminas que se usan en la industria electrónica como materiales de sustrato para los circuitos integrados. El proceso se muestra en el diagrama de la figura 17.10. Una pasta aguada cerámica se introduce en una película portadora móvil como el celofán. El espesor de la cerámica en la película portadora se determina por un limpiador llamado ***bisturí***. Al moverse la pasta por debajo de la línea, se seca formando una cinta cerámica fresca flexible. Al final de la línea se enreda la cinta en un carrete para su procesado posterior. La cinta fresca se puede cortar o procesar antes de cocerse.

Moldeo por inyección de polvos (PIM, por sus siglas en inglés) Es el mismo proceso que se usa en metalurgia de polvos (sección 16.4.2), excepto porque los polvos son cerámicos en lugar de metálicos. Las partículas cerámicas se mezclan con un polímero termoplástico que actúa como portador y que proporciona las características apropiadas de flujo a las temperaturas de moldeo. La mezcla se calienta y se inyecta en la cavidad de un molde. Cuando el polímero se enfría y endurece, se abre el molde y se retira la pieza. Debido a que las temperaturas que se necesitan para plastificar el portador son mucho más bajas que las requeridas para efectuar el sinterizado del material cerámico, la pieza sigue fresca después del moldeo. Antes del sinterizado se debe remover el aglutinante plástico. Esto se llama ***desaglomeración*** y se realiza generalmente por una combinación de tratamientos térmicos con solventes.

Las aplicaciones del moldeo por inyección de polvos para los cerámicos son limitadas debido a las dificultades en la desaglomeración y el sintetizado. El cocimiento del polímero es relativamente lento, y su remoción debilita la resistencia de la parte moldeada. Con frecuencia se presentan torceduras y grietas durante el sinterizado. Los productos cerámicos hechos por PIM son especialmente vulnerables a grietas microestructurales que limitan su resistencia.

17.2.3 Sinterizado

Como la plasticidad que se necesita para formar las nuevas cerámicas no se basa en una mezcla con agua, se puede omitir el secado comúnmente requerido para remover el agua de las cerámicas frescas tradicionales en el procesamiento de la mayoría de los nuevos productos cerámicos. Sin embargo, el paso de sinterizado todavía es muy necesario para obtener las máximas resistencia y dureza posibles. Las funciones de sinterizado son las

mismas que antes: 1) unir los granos individuales en una masa sólida, 2) incrementar la densidad y 3) reducir o eliminar la porosidad.

Para sinterizar el material cerámico se usan comúnmente temperaturas de 80 a 90% del punto de fusión. El mecanismo de sinterización es diferente entre las nuevas cerámicas, que se basan predominantemente en un solo compuesto químico (por ejemplo, Al_2O_3), y las cerámicas basadas en arcilla, las cuales comprenden a varios compuestos con diferentes puntos de fusión. En el caso de las nuevas cerámicas, el mecanismo de sinterizado es la difusión de masa a través de las superficies de contacto de las partículas, probablemente acompañada de algún flujo plástico. Este mecanismo ocasiona que los centros de las partículas se muevan para juntarse más; el efecto se traduce en una densificación del material final. En el sinterizado de cerámicas tradicionales, este mecanismo se complica por la fusión de algunos constituyentes y la formación de una fase glaseada que actúa como aglutinante entre los granos.

17.2.4 Acabado

Las piezas hechas con la nueva cerámica requieren algunas veces acabado. En general esta operación tiene uno o más de los siguientes propósitos: 1) incrementar la precisión dimensional, 2) mejorar el acabado de la superficie y 3) hacer cambios menores en la forma de la pieza. Las operaciones de acabado involucran generalmente esmerilado y otros procesos abrasivos (capítulo 25). Se necesita usar abrasivos de diamante para cortar los materiales cerámicos endurecidos.

17.3 PROCESAMIENTO DE CERMETS

Muchos compuestos en matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés) y compuestos en matriz cerámica (CMC) se procesan por métodos de procesamiento particulado. Los ejemplos más prominentes son los carburos cementados y otros cermets.

17.3.1 Carburos cementados

Los carburos cementados son una familia de los materiales compuestos que consisten en partículas de carburos cerámicos incorporadas en un metal aglutinante. Se clasifican como compuestos de matriz metálica debido a que el aglutinante metálico es la matriz que mantiene junta la masa del material; sin embargo, las partículas de carburo constituyen la proporción más grande del material compuesto y fluctúa normalmente entre 80 y 95% en volumen. Los carburos cementados se clasifican técnicamente como cermets, aunque con frecuencia se distinguen de otros materiales en esta clase.

El carburo cementado más importante es el carburo de tungsteno en un aglutinante de cobalto (WC-Co). En esta categoría se incluyen generalmente ciertas mezclas de WC, TiC y TaC en una matriz de Co en las cuales el carburo de tungsteno es el principal componente. Otros carburos cementados incluyen carburo de titanio en níquel (TiC-Ni) y carburo de cromo en níquel (Cr_3C_2-Ni). Estos compuestos se revisaron en la sección 9.2.1, y los ingredientes de carburo se describieron en la sección 7.3.2. Aquí interesa el procesamiento de carburos cementados que se basa en tecnologías particuladas.

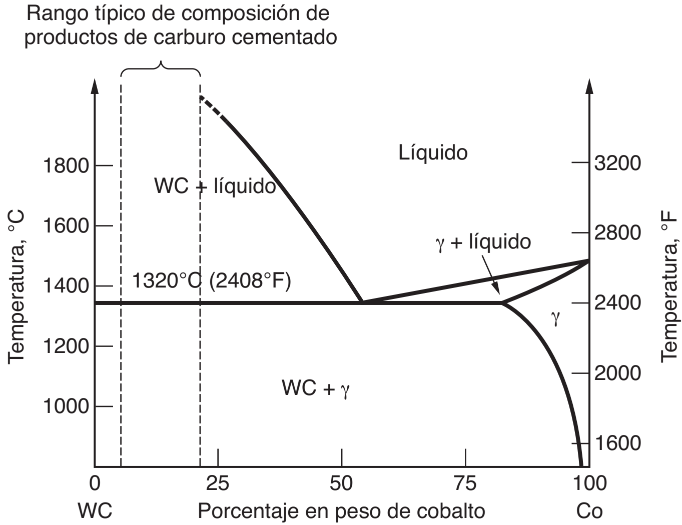
Para proveer una pieza fuerte y libre de poros, los polvos de carburo deben sinterizarse con un aglutinante metálico. El cobalto es el que funciona mejor con WC, en lo que el níquel es mejor con TiC y Cr_3C_2. La proporción usual de un aglutinante metálico va de 4% hasta 20%. Los polvos de carburo y el aglutinante metálico se mezclan perfectamente en húmedo en un molino de balines (u otra máquina mezcladora apropiada) para formar un lodo homogéneo. La molienda sirve también para refinar el tamaño de partícula. El lodo se seca después en una atmósfera controlada o al vacío para prevenir oxidación en la preparación para la compactación.

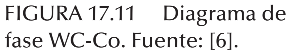
Compactación Se usan varios métodos para formar la mezcla de polvos en un compactado fresco de forma deseada. El proceso más común es el prensado frío, descrito anteriormente y usado para alta producción de piezas de carburo cementado, como insertos para herramientas de corte. Los troqueles que se usan en el prensado frío deben hacerse sobredimensionados para tomar en cuenta la contracción durante el sinterizado. La contracción lineal puede ser de 20% o más. Para alta producción, los troqueles se hacen con revestimiento de WC-Co para reducir el desgaste, debido a la naturaleza abrasiva de las partículas de carburo. Para cantidades más pequeñas, se prensan grandes secciones planas y luego se cortan en piezas más pequeñas de tamaño específico.

Se usan otros métodos de compactación para los productos de carburo cementado, entre los que se incluyen el ***prensado isostático*** y el ***prensado caliente*** para piezas grandes, como troqueles para estirado y balines para molinos, y ***extrusión*** para secciones transversales largas, formas circulares, rectangulares u otras. Cada uno de estos procesos se describió ya sea en este capítulo o en el anterior.

Sinterizado Aunque es posible sinterizar WC y TiC sin un metal aglutinante, el material resultante poseerá algo menos de 100% de la densidad real. La utilización de un aglutinante proporciona una estructura que virtualmente está libre de porosidad.

El sinterizado de WC-Co implica el sinterizado en fase líquida (sección 16.4.5). El proceso puede explicarse con el diagrama de fase binaria para estos constituyentes en la figura 17.11. En el diagrama se identifica el rango de composición típica para los productos comerciales de carburo cementado. Las temperaturas típicas de sinterizado para WC-Co se encuentran entre 1 370 ºC a 1 425 ºC (2 500 ºF a 2 600 ºF), las cuales están debajo del punto de fusión del cobalto, que es 1 495 ºC (2 716 ºF). Por consiguiente, el metal aglutinante puro no funde a la temperatura de sinterizado. Sin embargo, como muestra el diagrama de fase, el WC se disuelve en el Co en el estado sólido. Durante el tratamiento por calor, el WC se disuelve gradualmente dentro de la fase gamma y su punto de fusión se reduce, de tal forma que finalmente el metal se funde. A medida que se forma la fase líquida, ésta fluye y empapa las partículas de WC, y además disuelve el sólido. La presencia del metal fundido también sirve para remover gases de las regiones internas de la compactación. Estos mecanismos se combinan para efectuar un rearreglo entre las partículas remanentes de WC, lo cual produce un empaquetamiento más estrecho, y a su vez también una densificación y una contracción significativas de la masa del WC-Co. Posteriormente, durante el enfriado en el ciclo de sinterizado, el carburo disuelto se precipita y se deposita dentro de los cristales ya existentes, para formar una estructura consistente, la cual es empapada completamente por el aglutinante de Co.




FIGURA 17.11 Diagrama de fase WC-Co. Fuente: [6].

Operaciones secundarias Se requieren procesamientos subsecuentes después del sinterizado para lograr un control dimensional adecuado de las piezas de carburo cementado. El esmerilado con ruedas abrasivas de diamante o de otro material muy duro es la operación secundaria más común desempeñada para este propósito. Otros procesos usados para formar los carburos cementados duros incluyen el maquinado con descarga eléctrica y el maquinado ultrasónico, dos procesos de remoción de material no tradicionales que se analizan en el capítulo 26.

17.3.2 Otros cermets y compuestos de matriz cerámica

Además de los carburos cementados, otros cermets se basan en óxidos cerámicos como el Al_2O_3 y MgO. El cromo es un aglutinante metálico común que se usa en estos materiales compuestos. Las proporciones de cerámica a metal cubren un rango más amplio que el de los carburos cementados; en algunos casos el metal es el principal ingrediente. Estos cermets se transforman en productos útiles mediante los mismos métodos de formado que se usan para los carburos cementados.

La tecnología común de los compuestos en matriz cerámica (sección 9.3) incluye materiales cerámicos (por ejemplo, Al_2O_3, BN, Si_3N_4 y vidrio) reforzados con fibras de carbono, SiC o Al_2O_3. Si las fibras son bigotillos (fibras que consisten en un monocristal), estos CMC pueden procesarse por métodos particulados que se usan para las nuevas cerámicas (sección 17.2).

17.4 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PRODUCTOS

Si la aplicación es correcta, los materiales cerámicos tienen propiedades especiales que los hacen atractivos para los diseñadores. Las siguientes recomendaciones para el diseño, recopiladas por Bralla [2] y otras fuentes, se aplican a los materiales cerámicos tanto tradicionales como nuevos, aunque es más probable que los diseñadores encuentren oportunidades para los nuevos cerámicos en productos de ingeniería. En general, estos mismos lineamientos se aplican para carburos cementados.

- Los materiales cerámicos son varias veces más fuertes a la compresión que a la tensión; los componentes deben diseñarse para soportar esfuerzos de compresión, mas no esfuerzos de tracción.
- Las cerámicas son frágiles y casi no poseen ductilidad. Las piezas cerámicas no deben usarse en aplicaciones que impliquen cargas de impacto o altos esfuerzos que puedan causar fractura.
- Aunque muchos procesos de formado de cerámicos permiten formas complejas, es deseable mantener formas simples por razones económicas y técnicas. Debe evitarse perforaciones profundas, canales y muescas, así como grandes proyecciones en voladizo.
- Los bordes exteriores y las esquinas deben contener radios o chaflanes, y las esquinas inferiores deben ser redondeadas. Estos reglamentos se violan, por supuesto, en las aplicaciones para herramientas de corte, en los cuales los bordes cortantes deben ser agudos para que puedan funcionar. Los bordes de corte se fabrican frecuentemente con radios o chaflanes muy pequeños para protegerlos del desportillado microscópico que puede conducir a fallas.
- La contracción de la pieza en el secado y cocimiento (para cerámicas tradicionales), y en sinterizado (para cerámicas nuevas) puede ser significativa y el diseñador debe tomarla en cuenta para establecer dimensiones y tolerancias. Esto es principalmente un problema para los ingenieros de manufactura que deben determinar las tolerancias apropiadas para que las dimensiones finales estén dentro de las tolerancias especificadas.
- Se debe evitar las roscas en las piezas cerámicas. Son difíciles de fabricar y no tienen la resistencia adecuada en el servicio después de su fabricación.

REFERENCIAS

[1] Bhowmick, A. K., Bradley Pulverizer Company, Allentown, Pa., personal communication, febrero, 1992.

[2] Bralla, J. G. (editor-in-chief), ***Design for Manufacturing Handbook***, 2a. ed. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1999.

[3] Hlavac, J., ***The Technology of Glass and Ceramics***, Elsevier Scientific Publishing Co., Nueva York, 1983.

[4] Kingery, W. D., Bowen, H. K. y Uhlmann, D. R., ***Introduction to Ceramics***, 2a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[5] Richerson, D. W., ***Modern Ceramic Engineering***, 2a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1992.

[6] Schwarzkopf, P. y Kieffer, R., ***Cemented Carbides***, The Macmillan Co., Nueva York, 1960.

[7] Singer, F. y Singer, S. S., ***Industrial Ceramics***, Chemical Publishing Co., Nueva York, 1963.

[8] Somiya, S., editor, ***Advanced Technical Ceramics***, Academic Press, Inc., San Diego, Calif., 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

17.1. ¿Cuál es la diferencia entre las cerámicas tradicionales y las nuevas cerámicas desde el punto de vista de las materias primas?

17.2. Mencione los pasos básicos en la secuencia de procesamiento de las cerámicas tradicionales.

17.3. ¿Cuál es la diferencia técnica entre triturado y molienda en la preparación de materias primas para las cerámicas tradicionales?

17.4. Describa el proceso de vaciado deslizante en el procesamiento de las cerámicas tradicionales.

17.5. Mencione y describa brevemente algunos de los métodos de formado plástico que se usan para formar los productos cerámicos tradicionales.

17.6. ¿En qué consiste el proceso de torneado ligero?

17.7. ¿Cuál es la diferencia entre el prensado seco y el prensado semiseco de las piezas de cerámica tradicional?

17.8. ¿Qué le sucede a un material cerámico cuando se sinteriza?

17.9. ¿Cuál es el nombre del horno que se usa para cocer artículos cerámicos?

17.10. ¿Qué es el glaseado en el procesamiento de cerámicas tradicionales?

17.11. ¿Por qué es importante el secado en el procesamiento de las cerámicas tradicionales, no requerido usualmente en el procesamiento de las nuevas cerámicas?

17.12. ¿Por qué es más importante la preparación de las materias primas en el procesamiento de las nuevas cerámicas que para las cerámicas tradicionales?

17.13. ¿En qué consiste el proceso de secado por congelación que se usa para fabricar ciertos polvos de las nuevas cerámicas?

17.14. Describa el proceso del bisturí.

17.15. El sinterizado en fase líquida se usa para compactados de WC-Co, aun cuando las temperaturas de sinterizado están abajo del punto de fusión de WC y Co. ¿Cómo es posible esto?

17.16. Mencione algunas recomendaciones de diseño para piezas cerámicas.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 16 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

17.1. El siguiente equipo se usa para triturar y moler minerales en la preparación de materias primas para cerámicas tradicionales. ¿Cuál de las piezas que se mencionan se usa para moler? *a*) molino de balines, *b*) molino de martillo, *c*) triturador de quijadas, *d*) triturador de rodillos o *e*) molino de rodillos.

17.2. ¿Cuál de los siguientes compuestos se vuelve un material plástico y fácil de formar cuando se mezcla con cantidades adecuadas de agua? *a*) óxido de aluminio, *b*) óxido de hidrógeno, *c*) silicato hidratado de aluminio o *d*) bióxido de silicio.

17.3. ¿A qué porcentaje de agua se vuelve la arcilla un material plástico adecuado para los procesos de formación plástica de las cerámicas tradicionales? *a*) 5%, *b*) 10%, *c*) 20% o *d*) 40%.

17.4. ¿Cuál de los siguientes procesos no es un método de formado plástico que se usa para las cerámicas tradicionales? (hay tres respuestas correctas): *a*) prensado seco, *b*) extrusión, *c*) tejueleado, *d*) torneado ligero, *e*) moldeo al torno con estirado, *f*) vaciado deslizante o *g*) repujado.

17.5. El término pieza fresca se refiere en cerámica a una parte que ha sido formada, pero todavía no cocida: *a*) verdadero o *b*) falso.

17.6. En el producto final de un material cerámico nuevo policristalino, la resistencia aumenta con el tamaño del grano: *a*) verdadero o *b*) falso.

17.7. ¿Cuál de los siguientes procesos para materiales cerámicos nuevos realiza el formado y sinterizado simultáneamente? *a*) proceso del bisturí, *b*) secado por congelación, *c*) prensado caliente, *d*) moldeo por inyección o *e*) prensado isostático.

17.8. ¿Cuál de los siguientes no corresponde a los propósitos de las operaciones de acabado que se usan para piezas hechas con las nuevas cerámicas? (dos mejores respuestas): *a*) aplicar un recubrimiento superficial, *b*) galvanoplastia la superficie, *c*) mejorar el acabado de la superficie, *d*) incrementar la precisión dimensional o *e*) endurecer por trabajo la superficie.

17.9. ¿Cuál de los siguientes términos describe mejor lo que es un carburo cementado (una respuesta mejor): *a*) cerámica, *b*) cermet, *c*) compuesto, *d*) metal, *e*) nueva cerámica o *f*) cerámica tradicional.

17.10. ¿Cuál de las siguientes formas geométricas debe evitarse en el diseño de los componentes estructurales hechos de nuevas cerámicas (tres respuestas mejores): *a*) agujeros profundos, *b*) esquinas interiores redondeadas, *c*) esquinas exteriores redondeadas, *d*) bordes agudos, *e*) secciones delgadas o *f*) cuerdas?

Parte V
Formado de metal y trabajo de láminas metálicas

18 FUNDAMENTOS DEL FORMADO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

El ***formado de metales*** incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. La deformación es el resultado del uso de una herramienta que generalmente es un ***troquel*** para formar metales, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del metal. Por tanto, el metal se deforma para tomar la forma que determina la forma del troquel. El formado de metales domina el tipo de operaciones de formado que se identifican en el capítulo 1 como ***procesos de deformación*** (figura 1.4).

En general, se aplica el esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, algunos procesos de formado estiran el metal, mientras que otros lo doblan y otros más lo cortan. Para formar exitosamente un metal, éste debe poseer ciertas propiedades. Las propiedades convenientes para el formado son por lo general una baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad. Estas propiedades las afecta la temperatura. La ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando aumenta la temperatura de trabajo. El efecto de la temperatura da lugar a la distinción entre trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización y trabajo en caliente. La velocidad de formación y la fricción son factores adicionales que afectan el desempeño del formado de metales. En este capítulo se examinarán dichos aspectos, pero primero se da una visión general de los procesos de formado de metales.

18.1 PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

Los procesos del formado se pueden clasificar en: 1) procesos de deformación volumétrica y 2) procesos de trabajo de láminas metálicas. Estas dos categorías se cubren en detalle en los capítulos 19 y 20, respectivamente. Cada categoría incluye diferentes tipos de operaciones de formado, como se indica en la figura 18.1.

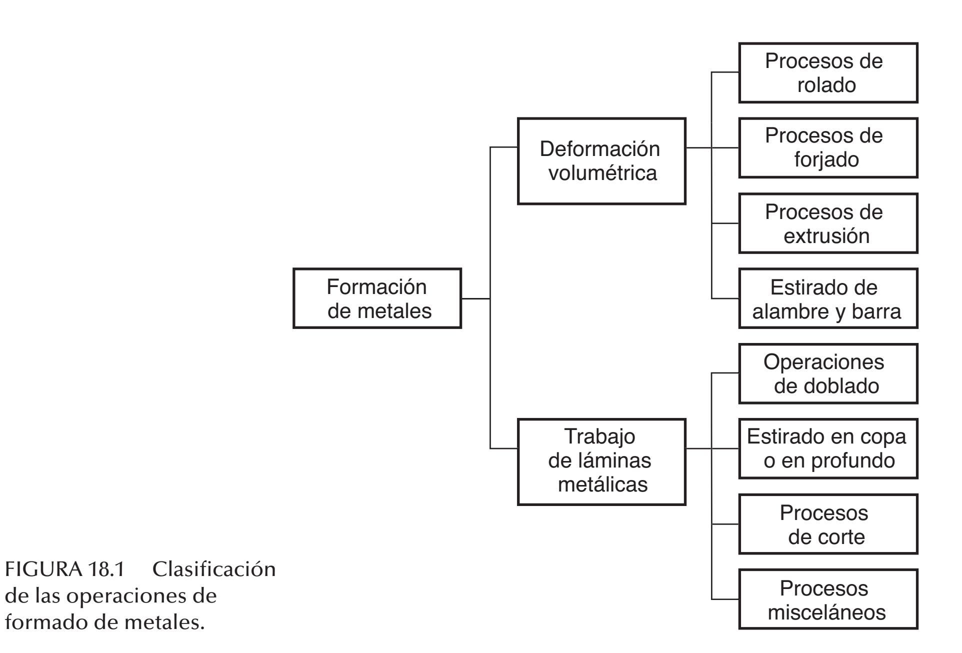


FIGURA 18.1 Clasificación de las operaciones de formado de metales.

Procesos de deformación volumétrica Los procesos de deformación volumétrica se caracterizan por deformaciones significativas y grandes cambios de forma, y la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. El término ***volumétrico*** describe a las piezas de trabajo que tienen esta baja relación de área-volumen. La forma del trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares. La operación básica en deformación volumétrica se ilustra en la figura 18.2 como sigue:

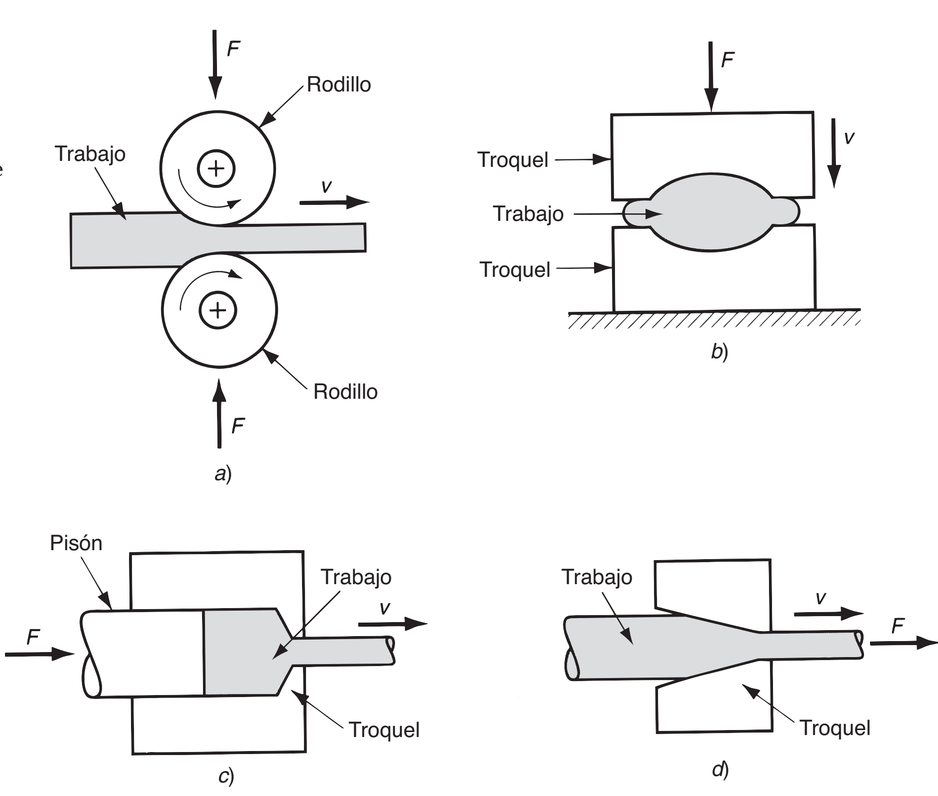
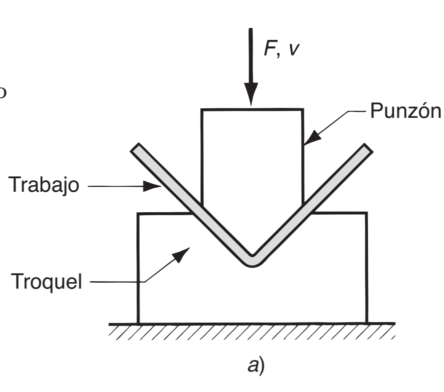


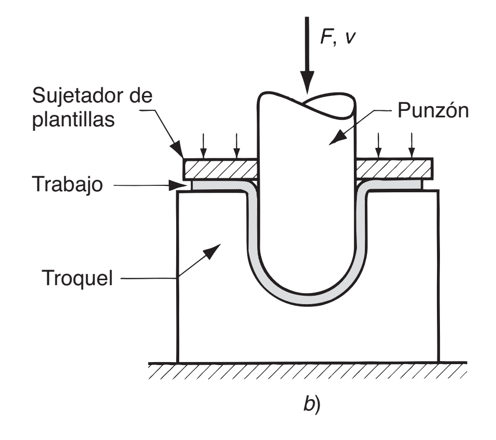
FIGURA 18.2 Procesos básicos de deformación volumétrica: *a*) rolado, *b*) forjado, *c*) extrusión y *d*) estirado. El movimiento relativo en las operaciones se indica por *v*, y las fuerzas se indican por *F*.

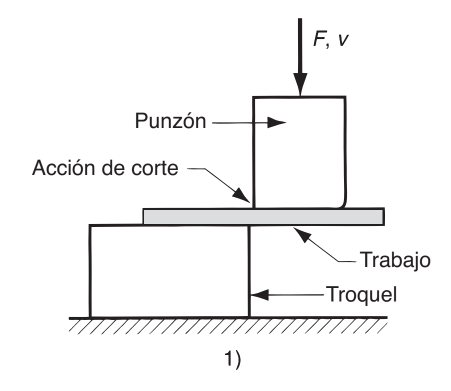
- ➢ ***Rolado.*** Es un proceso de deformación por compresión en el cual el espesor de una plancha o placa se reduce por medio de dos herramientas cilíndricas opuestas llamadas rodillos. Los rodillos giran para estirar y realizar el trabajo dentro de la abertura entre ellos y comprimirla.
- ➢ ***Forjado.*** En el forjado se comprime una pieza de trabajo entre dos troqueles opuestos, de manera que la forma del troquel se imprima para obtener el trabajo requerido. El forjado es un proceso tradicional de trabajo en caliente, pero muchos tipos de forjado se hacen también en frío.
- ➢ ***Extrusión.*** Es un proceso de compresión en el cual se fuerza el metal de trabajo a fluir a través de la abertura de un troquel para que tome la forma de la abertura de éste en su sección transversal.
- ➢ ***Estirado.*** En este proceso de formado, el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando se tira del alambre a través de la abertura del troquel.

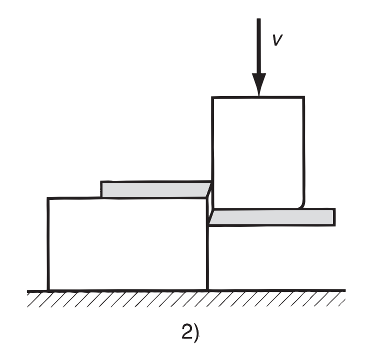
Trabajo de láminas metálicas Los procesos de trabajo de láminas metálicas son operaciones de formado o preformado de láminas, tiras y rollos de metal. La razón entre el área superficial y el volumen del material inicial es alta; por lo que esta relación es un medio útil para distinguir la deformación volumétrica de los procesos de láminas metálicas. ***Prensado*** es el término que se aplica frecuentemente a las operaciones de láminas metálicas, debido a que las máquinas utilizadas para desempeñar estas operaciones son prensas (se usan también prensas de varios tipos en otros procesos de manufactura). La pieza producida en una operación de laminado metálico se llama frecuentemente ***estampado***.

Las operaciones de láminas metálicas se ejecutan siempre en frío y se utiliza un juego de herramientas llamadas ***punzón*** y ***troquel***. El punzón es la porción positiva y el troquel es la porción negativa del juego de herramientas. Las operaciones básicas de láminas metálicas se describen en la figura 18.3 y se definen como sigue:









c)

FIGURA 18.3 Operaciones básicas en el trabajo de láminas metálicas: *a*) doblado, *b*) estirado y *c*) corte; 1) al primer contacto del punzón con la lámina y 2) después del corte. La fuerza y el movimiento relativo se indican por *F* y *v*.

- ➢ ***Doblado.*** El doblado implica la deformación de una lámina metálica o placa para que adopte un ángulo respecto a un eje recto, en la mayoría de los casos.
- ➢ ***Estirado.*** En el trabajo de láminas metálicas, el estirado se refiere a la transformación de una lámina plana de metal en una forma hueca o cóncava, como una copa, mediante el estirado del metal. Se usa un sujetador para mantener fija la plantilla, mientras el punzón empuja la lámina de metal, como se muestra en la figura 18.3*b*). Para distinguir esta operación del estirado de barras y alambres, se usan frecuentemente los términos ***estirado en copa*** o ***estirado profundo***.
- ➢ ***Corte.*** Este proceso queda de alguna manera fuera de lugar en nuestra lista de procesos de deformación, debido a que implica más el corte que el formado del metal. En esta operación se corta la pieza usando un punzón y un troquel, como se muestra en la figura 18.3*c*). Aunque éste no es un proceso de formado, se incluye aquí debido a que es una operación necesaria y muy común en el trabajo de láminas metálicas.

Los procesos misceláneos dentro de la clasificación del trabajo de láminas metálicas de la figura 18.1 incluye una de procesos de formado relacionados que no utilizan herramientas de prensado y troquel. Como ejemplos de estos procesos se encuentran el formado recto, doblado laminar, repujado y doblado de tubos.

18.2 COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN EL FORMADO DE METALES

La curva de esfuerzo-deformación ofrece una visión que permite comprender el comportamiento de los metales durante su formación. La curva típica de esfuerzo-deformación para la mayoría de los metales se divide en una región elástica y una región plástica (sección 3.1.1). En el formado de un metal, la región plástica es de interés primordial debido a que en estos procesos el material se deforma plástica y permanentemente.

La relación típica esfuerzo-deformación exhibe elasticidad por debajo del punto de fluencia, y endurecimiento por deformación arriba de dicho punto. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran este comportamiento en ejes lineales y logarítmicos. En la región plástica, el comportamiento del metal se expresa por la curva de fluencia:

$$\sigma = K\epsilon^n$$

donde K = coeficiente de resistencia, MPa (lb/in^2), y n es el exponente de endurecimiento por deformación. El esfuerzo σ y la deformación ∈ en la curva de fluencia son el esfuerzo real y la deformación real. La curva de fluencia es generalmente válida como una relación que define el comportamiento plástico de un metal en el trabajo en frío. Los valores típicos de K y n para diferentes metales a temperatura ambiente se enlistan en la tabla 3.4.

Esfuerzo de fluencia La curva de fluencia describe la relación esfuerzo-deformación en la región donde tiene lugar el formado del metal. También indica el esfuerzo de fluencia del metal, la propiedad de resistencia que determina las fuerzas y la potencia requerida para realizar una operación particular de formado. La gráfica esfuerzo-deformación de la figura 3.5 muestra que cuando la mayoría de los metales se deforma a temperatura ambiente, aumentan su resistencia debido al endurecimiento por deformación. El esfuerzo requerido para continuar la deformación debe incrementarse para contrarrestar este incremento de la resistencia. ***El esfuerzo de fluencia*** se define como el valor instantáneo del esfuerzo requerido para continuar la deformación del material o mantener "fluyendo" al metal. Ésta es la resistencia a la fluencia del metal en función de la deformación, que puede expresarse como:

$$Y_f = K\epsilon^n \quad (18.1)$$

donde Y_f = esfuerzo de fluencia, MPa (lb/in^2).

En las operaciones de formado individual que se revisarán en los dos capítulos siguientes, se puede usar el esfuerzo de fluencia instantáneo para analizar la secuencia del

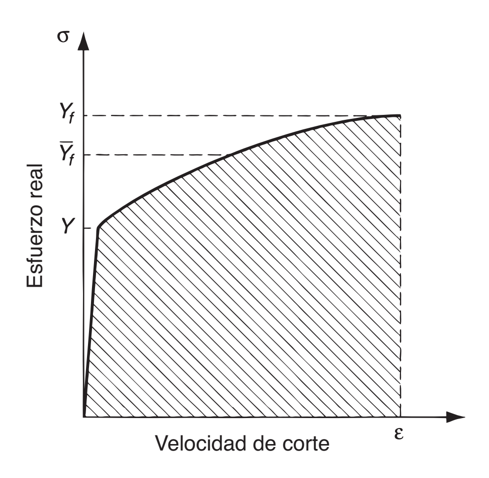


FIGURA 18.4 Curva de esfuerzo-deformación que indica la localización del esfuerzo de fluencia promedio $\overline{Y}_f$, en relación con la resistencia a la fluencia Y y el esfuerzo de fluencia final Y_f.

proceso. Por ejemplo, en ciertas operaciones de forja se puede determinar la fuerza instantánea durante la compresión a partir de los valores del esfuerzo de fluencia. La fuerza máxima se puede calcular basándose en el esfuerzo de fluencia que resulta del esfuerzo al final de la colada de la forja.

En otros casos, el análisis se basa en los promedios de esfuerzos y deformaciones que ocurren durante el mismo proceso de deformación, en lugar de los valores instantáneos. La extrusión representa este caso, figura 18.2*c*). Como consecuencia de la extrusión, la sección transversal del tocho se reduce y el metal se endurece gradualmente por deformación para alcanzar un valor máximo. Es más útil analizar el proceso con base en el esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación, que determinar una secuencia de valores instantáneos de esfuerzo-deformación durante la reducción, que no solamente sería difícil obtener, sino de limitado interés.

Esfuerzo de fluencia promedio El ***esfuerzo de fluencia promedio*** (también llamado ***esfuerzo de fluencia medio***) es el valor promedio de los esfuerzos sobre la curva esfuerzo-deformación desde el comienzo de la deformación hasta el valor final (máximo) que ocurre durante este proceso. El valor se ilustra en la gráfica esfuerzo-deformación de la figura 18.4.

El esfuerzo de fluencia promedio se determina integrando la ecuación de la curva de fluencia (ecuación 18.1) entre cero y el valor final de deformación que define el rango de interés. Esto genera la ecuación

$$\overline{Y}_f = \frac{K\epsilon^n}{1+n} \tag{18.2}$$

donde $\overline{Y}_f$ = esfuerzo de fluencia promedio, MPa (lb/in^2); y ϵ = máximo valor de deformación durante el proceso de deformación.

En el capítulo siguiente se hace un uso extensivo del esfuerzo de fluencia promedio en el estudio de los procesos de deformación volumétrica. Dados los valores de K y n para el material de trabajo, se desarrollará un método de cálculo de la deformación final para cada proceso. Con base en esta deformación, se puede usar la ecuación (18.2) para determinar el esfuerzo de fluencia promedio a que se sujeta el material durante la operación.

18.3 TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

La curva de fluencia es una representación válida del comportamiento esfuerzo-deformación de un metal durante su deformación plástica, particularmente en operaciones de trabajo en frío. Para cualquier metal, los valores de K y n dependen de la temperatura. Tanto la resistencia como el endurecimiento por deformación se reducen a altas temperaturas.

Además, la ductilidad se incrementa a altas temperaturas. Este cambio de propiedades es importante porque cualquier operación de deformación se puede alcanzar a temperaturas elevadas con fuerza y potencia menores. Hay tres rangos de temperatura: trabajo en frío, caliente por debajo o por encima del punto de recristalización.

Trabajo en frío ***El trabajo en frío***, también conocido como ***formado en frío***, es el formado de metal que se realiza a temperatura ambiente o ligeramente arriba. Las ventajas significativas del formado en frío comparado con el trabajo en caliente son: 1) proporcionar mejor precisión, lo que significa tolerancias más estrechas, 2) mejorar el acabado de la superficie, 3) el endurecimiento por deformación aumenta la resistencia y la dureza de la pieza, 4) el flujo de granos durante la deformación brinda la oportunidad de obtener propiedades direccionales convenientes en el producto resultante y 5) al no requerir calentamiento del trabajo, se ahorran costos de horno y combustible y se logran mayores velocidades de producción. Debido a esta combinación de ventajas, se han creado muchos procedimientos de formado en frío para operaciones importantes de producción en masa. Estos procedimientos proporcionan tolerancias estrechas y buenas superficies, minimizan la cantidad de maquinado y permiten que estos procedimientos se clasifiquen como procesos de forma neta o casi neta (sección 1.3.1).

Hay ciertas desventajas o limitaciones asociadas con las operaciones de formado en frío: 1) se requiere mayores potencia y fuerzas para desempeñar las operaciones, 2) se debe tener cuidado para asegurar que las superficies de la pieza de trabajo inicial están libres de incrustaciones y suciedad, 3) la ductilidad y el endurecimiento por deformación del metal de trabajo limitan la cantidad de formado que se puede hacer sobre la pieza. En algunas operaciones debe recocerse el metal (sección 8.1) para permitir la realización de formados posteriores. En otros casos el metal no es lo suficientemente dúctil para ser trabajado.

Para superar el problema de endurecimiento por deformación y reducir los requerimientos de fuerza y potencia, muchas operaciones de formado se ejecutan a temperaturas elevadas. Se involucran dos rangos de temperaturas elevadas que dan lugar a los términos trabajo en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización.

Trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización Debido a que las propiedades de deformación plástica se mejoran normalmente con el aumento de la temperatura en la pieza de trabajo, las operaciones de formado se realizan algunas veces a temperaturas algo más elevadas que la temperatura ambiente, pero por debajo de las temperaturas de recristalización. Se aplica el término ***trabajo en caliente*** a este segundo rango de temperatura. La línea divisoria entre el trabajo en caliente y el trabajo en frío se expresa frecuentemente en términos del punto de fusión del metal. La línea divisoria usual es de $0.3T_m$, donde T_m es el punto de fusión del metal particular (temperatura absoluta).

Menores resistencia y endurecimiento por deformación, así como la mayor ductilidad del metal a temperaturas intermedias confieren al trabajo por debajo de la temperatura de recristalización las siguientes ventajas sobre el trabajo en frío: 1) fuerzas más bajas y menores requerimientos de potencia, 2) son posibles trabajos más intrincados, 3) se puede eliminar o reducir la necesidad de recocido.

Trabajo en caliente ***El trabajo en caliente*** (también llamado ***formado en caliente)*** implica la deformación a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización. La temperatura de recristalización de un metal es aproximadamente la mitad de su punto de fusión en la escala absoluta. En la práctica, el trabajo en caliente se lleva a cabo usualmente a temperaturas por encima de $0.5T_m$. El metal de trabajo se suaviza más conforme la temperatura se incrementa más allá de $0.5T_m$, mejorando así la ventaja del trabajo en caliente por arriba de este nivel. Sin embargo, el proceso de deformación genera el calor que incrementa la temperatura de trabajo en algunas regiones de la pieza. Esto puede causar la fusión en estas regiones, lo cual es altamente indeseable. Las incrustaciones en la superficie de trabajo se aceleran también a temperaturas más altas. Por consiguiente, las temperaturas de trabajo en caliente se mantienen normalmente dentro del rango de $0.5T_m$ a $0.75T_m$.

La ventaja más significativa del trabajo en caliente es la capacidad de producir deformaciones plásticas sustanciales del metal, más de las que son posibles con el trabajo en frío o el trabajo que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recristalización. La razón principal es que la curva de fluencia del metal trabajado en caliente tiene un coeficiente de resistencia sustancialmente menor que a temperatura ambiente, el exponente de endurecimiento por deformación es cero (al menos en teoría) y la ductilidad del metal se incrementa de manera significativa. Todo esto da por resultado las siguientes ventajas respecto al trabajo en frío: 1) la forma de la pieza de trabajo se puede alterar de manera significativa, 2) se requiere menor fuerza y potencia para deformar el metal, 3) los metales que usualmente se fracturan en el trabajo en frío pueden formarse en caliente, 4) las propiedades de resistencia son generalmente isotrópicas debido a la ausencia de una estructura orientada de granos que se crea en el trabajo en frío, 5) el trabajo en caliente no produce fortalecimiento de la pieza. Esta última ventaja puede parecer inconsistente, ya que el aumento en la resistencia del metal se considera frecuentemente una ventaja del trabajo en frío. Sin embargo, hay aplicaciones en las cuales es indeseable que el metal se endurezca por trabajo debido a que reduce su ductilidad, por ejemplo, cuando la pieza tiene que procesarse posteriormente en frío. Sus desventajas son: precisión dimensional más baja, mayores requerimientos de energía (energía térmica para calentar la pieza de trabajo), oxidación de la superficie de trabajo (incrustaciones), acabado superficial más deficiente y menor duración en la vida de las herramientas.

La recristalización del metal en el trabajo en caliente involucra difusión atómica, proceso que depende del tiempo. Las operaciones de formado del metal se desempeñan frecuentemente a altas velocidades que no dejan tiempo suficiente para completar la recristalización de la estructura granular durante el ciclo de deformación. Sin embargo, debido a las altas temperaturas, la recristalización ocurre a la larga, ya sea inmediatamente después del proceso de formado o más tarde, al enfriarse la pieza de trabajo. Aun si la recristalización ocurre después de la verdadera deformación, su ocurrencia final junto con el suavizado sustancial del metal a altas temperaturas es la característica que distingue al trabajo en caliente del trabajo por debajo de la temperatura de recristalización o en frío.

Formado isotérmico Ciertos metales como los aceros altamente aleados, muchas aleaciones de titanio y las aleaciones de níquel para altas temperaturas poseen buena dureza en caliente, propiedad que los hace útiles para el uso a altas temperaturas. Y aunque dichas propiedades los hacen atractivos para estas aplicaciones, también los hace difíciles de formar por métodos convencionales. El problema es que cuando estos metales se calientan a las temperaturas de trabajo en caliente y entran en contacto con las herramientas de formado relativamente frías, el calor es transferido de manera rápida fuera de la superficie de la pieza, elevando la resistencia en estas regiones. La variación en la temperatura y la resistencia en diferentes regiones de la pieza de trabajo producen patrones de flujo irregular en el metal durante la deformación; esto conduce a la formación de esfuerzos residuales y al posible agrietamiento superficial.

El ***formado isotérmico*** se refiere a las operaciones de formado que se llevan a cabo de tal manera que eliminan el enfriamiento superficial y los gradientes térmicos resultantes en la pieza de trabajo. Se realiza por precalentamiento de las herramientas que entran en contacto con la pieza a la misma temperatura de trabajo del metal. Esto desgasta las herramientas y reduce la vida, pero evita los problemas descritos cuando los metales difíciles se forman por métodos convencionales. En algunos casos el formado isotérmico representa la única forma en que pueden formarse estos materiales de trabajo. El procedimiento se asocia más estrechamente con el forjado y en el capítulo siguiente se revisará el formado isotérmico.

18.4 SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

En teoría, un metal en trabajo en caliente se comporta como un material perfectamente plástico, con un exponente de endurecimiento por deformación $n = 0$. Esto significa que una vez que se alcanza el nivel de esfuerzo de fluencia, el metal debe continuar fluyendo

bajo el mismo nivel de esfuerzo de fluencia. Sin embargo, un fenómeno adicional caracteriza el comportamiento de los metales durante su deformación, especialmente a las temperaturas elevadas del trabajo en caliente. Este fenómeno es la sensibilidad a la velocidad de deformación. En esta revisión, se empezará por definir la velocidad de deformación.

La rapidez a la que se deforma el metal en un proceso de formado se relaciona directamente con la velocidad de deformación v. En muchas operaciones de formado, la velocidad de deformación es igual a la velocidad del pistón o de cualquier otro elemento móvil del equipo. Esto se visualiza más fácilmente en un ensayo de tensión, como la velocidad del cabezal de la máquina respecto a su base fija. Dada la rapidez de deformación, la ***velocidad de deformación*** se define:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h} \tag{18.3}$$

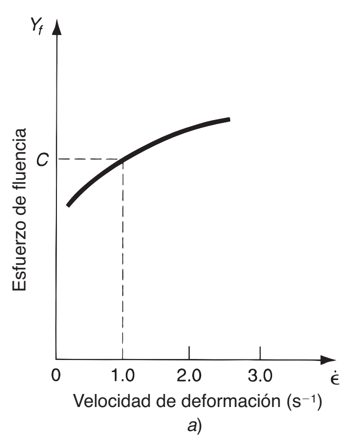
donde $\dot{\epsilon}$ = velocidad de deformación real, m/s/m (in/s/in), o simplemente s^{-1}; y h = altura instantánea de la pieza de trabajo que se deforma, m (in). Si la velocidad de deformación v es constante durante la operación, entonces ésta varía al cambiar h. En la mayoría de las operaciones prácticas de formado, la valoración de la velocidad de deformación se complica por la forma de la pieza de trabajo y las variaciones en la velocidad de deformación en diferentes regiones de la pieza. La velocidad de deformación puede alcanzar 1 000 s^{-1} o más para algunos procesos de formado de metal, como rolado y forjado a alta velocidad.

Ya se ha observado que el esfuerzo de fluencia de un metal es una función de la temperatura. En las temperaturas de trabajo en caliente, el esfuerzo de fluencia depende de la velocidad de deformación. El efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades de resistencia se conoce como ***sensibilidad a la velocidad de deformación***. El efecto se puede ver en la figura 18.5. Al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación. Esto se representa de manera usual como una línea aproximadamente recta en una gráfica log-log, lo cual conduce a la relación siguiente

$$Y_f = C\dot{\epsilon}^m \tag{18.4}$$

donde C es la constante de resistencia (similar pero no igual al coeficiente de resistencia en la ecuación de la curva de fluencia) y m es el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación. El valor de C se determina a una velocidad de deformación de 1.0, y m es la pendiente de la curva en la figura 18.5*b*).

El efecto de la temperatura sobre los parámetros de la ecuación (18.4) es notable. Al incrementar la temperatura, decrece el valor de C (consistente con su efecto sobre K en la ecuación de la curva de fluencia) y aumenta el valor de m. El resultado general se puede ver en la figura 18.6. A temperatura ambiente el efecto de la velocidad de deformación es casi despreciable, e indica que la curva de fluencia es una buena representación del comportamiento del material. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de deformación juega un papel más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia, como se indica por las pendientes más grandes de las relaciones deformación-velocidad. Esto es importante en el trabajo en caliente porque la resistencia a la deformación del



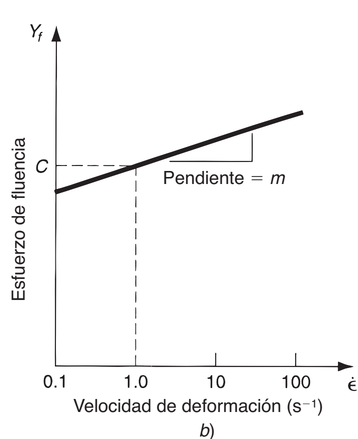


FIGURA 18.5 *a*) Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la fluencia a temperatura de trabajo elevada, *b*) la misma relación graficada en coordenadas log-log.

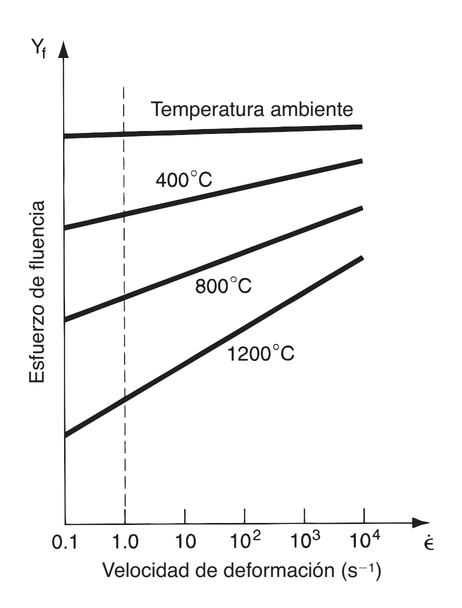


FIGURA 18.6 Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia para un metal típico. La constante *C* en la ecuación (18.4), indicada por la intersección de cada línea continua con la línea punteada vertical a una velocidad de deformación = 1.0, decrece, y *m* (pendiente de cada línea) aumenta al incrementarse la temperatura.

material aumenta drásticamente con el incremento de la velocidad de deformación. Para dar una idea del efecto, en la tabla 18.1 se proporcionan los valores típicos de *m* para los tres rangos de temperatura del trabajo en metales.

Se puede observar que aun en el trabajo en frío la velocidad de deformación puede tener un efecto mínimo sobre el esfuerzo de fluencia. En el trabajo en caliente el efecto puede ser significativo. Una expresión más completa para el esfuerzo de fluencia como función de la deformación y de la velocidad de deformación podría ser la siguiente:

$$Y_f = A\dot{\epsilon}^n \dot{\epsilon}^m \qquad (18.5)$$

donde A = un coeficiente de resistencia que combina los efectos de los valores previos de K y de C. Por supuesto, A, n y m podrían ser funciones de la temperatura, y el enorme trabajo de ensayar y recopilar los valores de estos parámetros para diferentes metales y varias temperaturas podría ser prohibitivo.

En esta cobertura de varios procesos de deformación volumétrica que se hará en el capítulo 19, se verá que muchos de ellos se realizan en caliente, y se desprecia el efecto de la velocidad de deformación en el análisis de las fuerzas y la potencia. Para las operaciones de trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización y trabajo en caliente por arriba de la temperatura de recristalización, a velocidades de deformación relativamente bajas, esta subestimación representa una suposición razonable.

18.5 FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES

La fricción en el formado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta y el material de trabajo, y a las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones. En la mayoría de los procesos de formado, la fricción es inconveniente por las siguientes razones: 1) retarda el flujo del metal en el trabajo, ocasionando

TABLA 18.1 Valores típicos de temperatura, sensibilidad a la velocidad de deformación y coeficiente de fricción en trabajo en frío, en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización.

Categoría	Rango de temperatura	Exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación	Coeficiente de fricción
Trabajo en frío	$\leq 0.3T_m$	$0 \leq m \leq 0.05$	0.1
Trabajo en caliente por debajo de la temp. de recrist.	$0.3T_m$ - $0.5T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.1$	0.2
Trabajo en caliente por encima de la temp. de recrist.	$0.5T_m$ - $0.75T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.4$	0.4 - 0.5

esfuerzos residuales y algunas veces defectos del producto, 2) se incrementan las fuerzas y la potencia para desempeñar la operación y 3) el desgaste de las herramientas puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, lo cual da por resultado piezas defectuosas y el remplazo de las herramientas. Como las herramientas para formado de metales son generalmente costosas, su desgaste es de una mayor importancia. La fricción y el desgaste de las herramientas son más severos en el trabajo en caliente, debido a las condiciones más rudas.

La fricción en el formado de metales es diferente a la que se encuentra en la mayoría de los sistemas mecánicos, como trenes de engranajes, flechas, cojinetes y otros componentes que involucran un movimiento relativo entre las superficies. Estos casos se caracterizan generalmente por bajas presiones de contacto, temperaturas entre bajas y moderadas, y una lubricación amplia para minimizar el contacto entre los metales. Por el contrario, las condiciones en el formado de metales representan presiones altas entre la superficie dura de la herramienta y la pieza de trabajo suave, deformación plástica del material más suave y altas temperaturas (al menos en el trabajo en caliente). Estas condiciones pueden generar coeficientes de fricción relativamente altos en el metal de trabajo, incluso con la adición de lubricantes. Los valores típicos del coeficiente de fricción para las tres categorías de formado de metales aparecen en la tabla 18.1.

Si el coeficiente de fricción llega a ser lo suficientemente grande, ocurre una condición conocida como adherencia. La ***adherencia*** en el trabajo de metales (también llamada ***fricción por adherencia***) es la tendencia de las dos superficies en movimiento relativo a pegarse una a la otra en lugar de deslizarse. Esto significa que el esfuerzo de fricción entre las superficies excede al esfuerzo de flujo cortante del metal de trabajo, ocasionando que el metal se deforme por un proceso de corte por debajo de la superficie, en lugar de que ocurra un deslizamiento entre las superficies. La adherencia ocurre en las operaciones de formado de metal y es un problema prominente en el rolado; se estudia en ese contexto en el capítulo siguiente.

Los lubricantes para el trabajo de los metales se aplican en la interfaz herramienta-trabajo en muchas operaciones de formado para reducir los perjudiciales efectos de la fricción. Los beneficios que se obtienen de su aplicación incluyen una reducción en la adherencia, en las fuerzas, en la potencia y en el desgaste de las herramientas, así como un mejor acabado de la superficie en el producto final. Los lubricantes tienen también otras funciones, como reducir el calor en las herramientas. Las consideraciones para escoger un lubricante apropiado para el trabajo de metales incluyen el tipo de procesos de formado que se va a utilizar (rolado, forjado, estirado de lámina metálica u otros), ya sea trabajo en caliente o trabajo en frío, así como el material de trabajo, la reactividad química con la herramienta y con los metales de trabajo (por lo general, es deseable que los lubricantes se adhieran a las superficies para que sean más efectivos en la reducción de la fricción), facilidad de aplicación, bajas toxicidad, inflamabilidad y escaso costo.

Los lubricantes usados para operaciones de trabajo en frío incluyen aceites minerales, grasas y aceites grasos, emulsiones en agua, jabones y otros recubrimientos [3], [5]. El trabajo en caliente se realiza algunas veces en seco para ciertas operaciones y materiales (por ejemplo, el laminado en caliente del acero y la extrusión de aluminio). Cuando los lubricantes se usan para trabajo en caliente incluyen aceites minerales, grafito y vidrio. El vidrio fundido se convierte en un lubricante efectivo para la extrusión en caliente de aleaciones de acero. El grafito contenido en agua o aceite mineral es un lubricante común para el forjado en caliente de varios materiales de trabajo. En las referencias [5] y [7] se encuentran más detallados los tratamientos de lubricación en el trabajo de metales.

REFERENCIAS

[1] Altan, T. Oh, S.-I. y Gegel, H. L., ***Metal Forming: Fundamentals and Applications***, ASM International, Materials Park, Ohio, 1983.

[2] Cook, N. H., ***Manufacturing Analysis***, Addison-Wesley Publishing Company., Inc., Reading, Massachusetts. 1966.

[3] Lange, K., *et al*. (eds.), ***Handbook of Metal Forming***, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1995.

[4] Mielnik, E. M., ***Metalworking Science and Engineering***, McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1991.

[5] Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., ***Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations***, Marcel Dekker, Inc. Nueva York, 1985.

[6] Wagoner, R. H. y Chenot, J. L., ***Fundamentals of Metal Forming***, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1997.

[7] Wick, C., *et al*. (eds.), ***Tools and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. II, ***Forming***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

18.1. ¿Cuáles son las características que distinguen a los procesos de deformación volumétrica de los procesos con láminas metálicas?

18.2. La extrusión es un proceso fundamental del formado. Descríbala.

18.3. ¿Por qué se usa con frecuencia el término prensado para los procesos con láminas metálicas?

18.4. ¿Cuál es la diferencia entre el estirado profundo (embutido profundo) y el estirado de barras?

18.5. Indique la ecuación matemática para la curva de fluencia.

18.6. ¿Cómo afecta el incremento de temperatura a los parámetros de la ecuación de la curva de fluencia?

18.7. Indique algunas de las ventajas del trabajo en frío respecto al trabajo por debajo y encima de la temperatura de recristalización.

18.8. ¿Qué es el formado isotérmico?

18.9. Describa los efectos de la velocidad de deformación en el formado de metales.

18.10. ¿Por qué es indeseable la fricción en las operaciones del formado de metales?

18.11. ¿Qué es la fricción por adherencia en el trabajo de metales?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 13 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

18.1. ¿Cuál de los siguientes es un proceso de formación volumétrica? (tres respuestas correctas): *a*) doblado, *b*) estirado profundo, *c*) extrusión, *d*) forjado, *e*) laminado y *f*) cortado.

18.2. ¿Cuál de las siguientes opciones son típicas de la forma de la pieza en los procesos con láminas metálicas? *a*) alta relación de volumen-área o *b*) baja relación de volumen-área.

18.3. ¿En cuál de las siguientes regiones de la curva esfuerzo-deformación la curva de fluencia expresa el comportamiento de un metal? *a*) región elástica o *b*) región plástica.

18.4. ¿Por cuál de los siguientes factores se multiplica el esfuerzo de fluencia para obtener el esfuerzo de fluencia promedio? *a*) n, *b*) $(1+n)$, *c*) $1/n$, o *d*) $1/(1+n)$, donde n es el exponente de endurecimiento por formación.

18.5. ¿El trabajo en caliente de metales se refiere a cuál de las siguientes regiones de temperatura, respecto al punto de fusión del metal, dado en una escala de temperatura absoluta? *a*) temperatura ambiente, *b*) $0.2T_m$, *c*) $0.4T_m$ o *d*) $0.6T_m$.

18.6. ¿Cuáles de las siguientes opciones son ventajas y características del trabajo en caliente respecto al trabajo en frío? (cuatro respuestas correctas): *a*) menos probabilidad de fractura de la pieza de trabajo, *b*) se reduce la fricción, *c*) propiedades de resistencia aumentadas, *d*) propiedades mecánicas isotrópicas, *e*) menores requerimientos de energía total, *f*) menores requerimientos de fuerzas de deformación, *g*) posibilidad de cambios más significativos de forma y *h*) se reduce la sensibilidad a la velocidad de deformación.

18.7. ¿El aumento en la velocidad de deformación tiende a producir cuál de los siguientes efectos sobre el esfuerzo de fluencia durante el formado en caliente de un metal? *a*) disminución del esfuerzo de fluencia, *b*) no tiene efecto, *c*) incremento de esfuerzo de fluencia.

18.8. ¿Cuál de las siguientes opciones respecto a su valor en el trabajo en caliente tiende a ser el coeficiente de fricción entre la pieza y la herramienta en el trabajo en frío? *a*) mayor, *b*) menor, *c*) sin efecto.

PROBLEMAS

Curva de fluencia de formado

18.1. Los parámetros para cierto metal son: coeficiente de resistencia igual a 550 MPa y exponente de endurecimiento por deformación de 0.22. Durante una operación de formado, el esfuerzo real final que experimenta el metal es de 0.85. Determine el esfuerzo de fluencia a esta deformación y el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el metal durante la operación.

18.2. Un metal tiene una curva de fluencia con los parámetros coeficiente de resistencia de 850 MPa y exponente de endurecimiento por deformación de 0.30. Una probeta de metal

en tensión con longitud de calibración de 100 mm se estira a una longitud de 157 mm. Determine el esfuerzo de fluencia a esta nueva longitud y el esfuerzo de fluencia promedio al que se sujetó el metal durante la deformación.

18.3. Un metal tiene una curva de fluencia con los siguientes parámetros: coeficiente de resistencia de 35 000 lb/in^2 y exponente de endurecimiento por deformación de 0.26. Una probeta en tensión de metal con longitud de calibración de 2.0 in se estira a una longitud de 3.3 in. Determine el esfuerzo de fluencia a esta nueva longitud y el esfuerzo de fluencia promedio al que se sujetó el metal durante la deformación.

18.4. El coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación de cierto material de prueba son 40 000 lb/in^2 y 0.19, respectivamente. Una probeta cilíndrica del metal con diámetro inicial de 2.5 in y una longitud de 3.0 in se comprime a una longitud de 1.5 in. Determine el esfuerzo de fluencia a la mueva longitud y el esfuerzo de fluencia promedio al cual ha estado sujeto el metal durante la deformación.

18.5. Deduzca la ecuación para el esfuerzo de fluencia promedio; ecuación (18.2).

18.6. Para cierto metal, el coeficiente de resistencia es de 700 MPa y el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.27. Determine el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el metal si se le sujeta a un esfuerzo igual a su coeficiente de resistencia *K*.

18.7. Determine el valor del exponente de endurecimiento por deformación para un metal que ocasionará que el esfuerzo de fluencia promedio sea 3/4 del esfuerzo de fluencia final después de la deformación.

18.8. El coeficiente de resistencia es de 35 000 lb/in^2 y el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.40 para un metal que se usa en una operación de formado, en la cual la pieza de trabajo reduce el área de su sección transversal por estirado. Si el esfuerzo de fluencia promedio sobre la pieza es de 20 000 lb/in^2, determine la cantidad de reducción de área de la sección transversal que experimenta la pieza.

18.9. En una prueba de esfuerzo, dos pares de valores de esfuerzo y endurecimiento se midieron para una probeta de metal después de que había dado: 1) esfuerzo real de 217 MPa y deformación real de 0.35 y 2) esfuerzo real de 259 MPa y deformación real de 0.68. Con base en esta información, determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación.

18.10. Los valores de esfuerzo y deformación siguientes se midieron en la región plástica durante una prueba de tensión llevada a cabo con un nuevo metal experimental: 1) esfuerzo real de 43 608 lb/in^2 y deformación real de 0.27 in/in, 2) y esfuerzo real de 52 048 lb/in^2 y deformación real de 0.85 in/in. Con base en esta información, determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación.

Velocidad de deformación

18.11. Una probeta con una longitud inicial de calibración de 150 mm está sujeta a un ensayo de tensión en el cual las mordazas que sostienen el extremo de la probeta de prueba se mueven a una velocidad relativa de 0.1 m/s. Construya una gráfica de la velocidad de deformación como función de la longitud, cuando la probeta se estira a una longitud de 200 mm.

18.12. Una probeta con una longitud inicial de calibración de 6.0 in está sujeta a un ensayo de tensión en el cual las mordazas que sostienen el extremo de la probeta de prueba se mueven a una velocidad relativa de 1.0 in/s. Construya una gráfica de la velocidad de deformación como función de la longitud, cuando la probeta se estira a una longitud de 8.0 in.

18.13. Una pieza de trabajo con una altura inicial h de 100 mm se comprime a una altura final de 50 mm. Durante la deformación, la velocidad relativa de las placas que comprimen la pieza es de 200 mm/s. Determine la velocidad de deformación para: *a*) $h = 100$ mm, *b*) $h = 75$ mm y *c*) $h = 51$ mm.

18.14. Una operación de trabajo en caliente se lleva a cabo a varias velocidades. La constante de resistencia es de 30 000 lb/in^2 y el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación es de 0.15. Determine el esfuerzo de fluencia si la velocidad de deformación es *a*) 0.01/s, *b*) 1.0/s, *c*) 100/s.

18.15. Un ensayo de tensión para cierto metal se lleva a cabo para determinar estos parámetros: constante de esfuerzo C y el exponente a la sensibilidad a la velocidad de deformación m en la ecuación (18.4). La temperatura a la que se lleva a cabo la prueba es de 500 ºC. A la velocidad de deformación de 12/s, el esfuerzo se mide a 160 MPa; y a velocidad de deformación de 250/s, el esfuerzo es de 300 MPa. *a*) Determine C y m. *b*) Si la temperatura fuera de 600 ºC, ¿qué cambios esperaría en los valores de C y m?

18.16. Un ensayo de tensión para cierto metal se lleva a cabo para determinar la constante de resistencia C y el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación m a 1 000 ºF. A una velocidad de deformación de 10/s, el esfuerzo se mide a 23 000 lb/in^2; y a una velocidad de deformación de 300/s, el esfuerzo es de 45 000 lb/in^2. *a*) Determine C y m. *b*) Si la temperatura fuera de 900 ºF, ¿qué cambios esperaría en los valores de C y m?

19 PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN EL TRABAJO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los procesos de deformación descritos en este capítulo realizan un cambio significativo en las piezas del metal cuya forma inicial es más voluminosa que laminar. Las formas iniciales incluyen barras, tochos cilíndricos, tochos rectangulares y planchas, así como otras formas similares elementales. Los procesos de deformación volumétrica que refinan las formas originales, algunas veces mejoran las propiedades mecánicas y siempre adicionan un valor comercial al producto. El trabajo de los procesos de deformación consiste en someter el metal a un esfuerzo suficiente para hacer que éste fluya plásticamente y tome la forma deseada.

Los procesos de deformación volumétrica se realizan en operaciones de trabajo en frío, y caliente tanto por arriba como por debajo de la temperatura de cristalización. El trabajo en frío o debajo de la temperatura de cristalización es apropiado cuando el cambio de forma es menos severo y hay necesidad de mejorar las propiedades mecánicas, o alcanzar un buen acabado en la pieza final. El trabajo en caliente se requiere generalmente cuando involucra la deformación volumétrica de grandes piezas de trabajo.

La importancia tecnológica y comercial de los procesos de deformación volumétrica surge a partir de lo siguiente:

- Con las operaciones de trabajo en caliente se pueden lograr cambios significativos en la forma de las piezas de trabajo.
- Las operaciones de trabajo en frío se pueden usar no solamente para dar forma al producto, sino también para incrementar su resistencia mediante el endurecimiento por deformación.
- Estos procesos producen poco o ningún desperdicio como subproducto de la operación. Algunas operaciones de deformación volumétrica son procesos de ***forma neta*** o ***casi neta***; se alcanza la forma final con poco o ningún maquinado posterior.

Los procesos de deformación volumétrica que se cubren en este capítulo son: 1) laminado, 2) forjado, 3) extrusión, 4) estirado de alambre y barras. El capítulo también documenta las variantes y operaciones afines a los cuatro procesos básicos que se han desarrollado a través de los años.

19.1 LAMINADO

El ***laminado*** es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos. Los rodillos giran, como se ilustra en la figura 19.1, para jalar del material del trabajo y simultáneamente apretarlo entre ellos. El proceso básico ilustrado en la figura es el laminado plano, que se usa para reducir el espesor de una sección transversal rectangular. Un proceso estrechamente relacionado es el laminado de perfiles, en el cual una sección transversal cuadrada se transforma en un perfil, tal como en una viga en I.

La mayoría de los procesos de laminado involucran una alta inversión de capital, requieren piezas de equipo pesado llamadas molinos laminadores o de laminación. El alto costo de inversión requiere que los molinos se usen para producción en grandes cantidades de artículos estándar, como láminas y placas. La mayoría del laminado se realiza en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida, y se le llama ***laminado en caliente***. Los metales laminados en caliente están generalmente libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Las desventajas del laminado en caliente son que el producto no puede mantenerse dentro de tolerancias adecuadas, y la superficie presenta una capa de óxido característica.

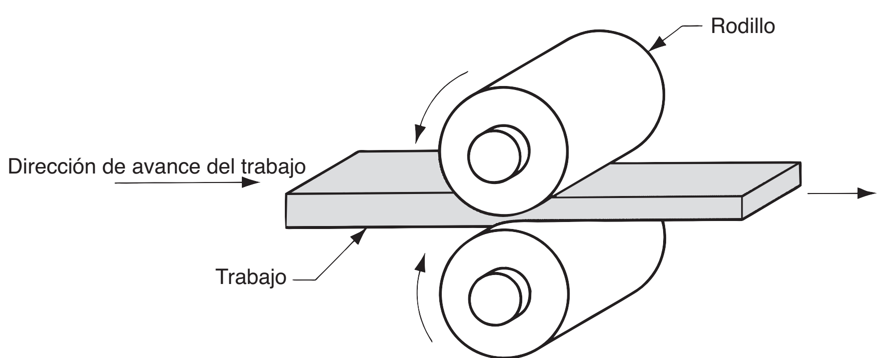


FIGURA 19.1 Proceso de laminación, específicamente laminado plano.

La fabricación de acero representa la aplicación más común de las operaciones de laminación (véase Nota histórica 19.1). Se analizará la secuencia de pasos en un molino de laminación para ilustrar la variedad de productos que pueden hacerse. En otras industrias metálicas básicas se encuentran pasos similares. El trabajo empieza con un lingote de acero fundido recién solidificado. Aún caliente, el lingote se coloca en un horno donde permanece durante muchas horas, hasta alcanzar la temperatura uniforme en toda su extensión, para que pueda fluir consistentemente durante el laminado. Para el acero, la temperatura de laminación es alrededor de 1 200 ºC (2 200 ºF). La operación de calentamiento se llama ***recalentado*** y los hornos en los cuales se lleva a cabo se llaman ***fosas de recalentamiento***.

El lingote recalentado pasa al molino de laminación, donde se lamina para convertirlo en una de las tres formas intermedias llamadas lupias, tochos o planchas. Una ***lupia*** tiene una sección transversal cuadrada de 150 × 150 mm (6 × 6 in) o mayor. Una ***plancha*** se lamina a partir de un lingote o de una lupia y tiene una sección rectangular de 250 mm (10 in) de ancho o más, y un espesor de de 40 mm (1.5 in o más). Un ***tocho*** se lamina a partir de una lupia y es cuadrado, con dimensiones de 40 mm (1.5 in) por lado o mayor. Estas formas intermedias se laminan posteriormente para convertirlas en productos finales.

Las lupias se laminan para generar perfiles estructurales y rieles para ferrocarril. Los tochos se laminan para producir barras y varillas. Estas formas son la materia prima para el maquinado, estirado de alambre, forjado y otros procesos de trabajo de metales. Las planchas se laminan para convertirlas en placas, láminas y tiras. Las placas laminadas en caliente se usan para la construcción de barcos, puentes, calderas, estructuras soldadas para maquinaria pesada, tubos y tuberías, y muchos otros productos. La figura 19.2 muestra algunos de estos productos laminados de acero. El laminado posterior de las placas y láminas trabajadas en caliente se realiza frecuentemente por ***laminado en frío***, a fin de prepararlas para operaciones posteriores de trabajo en lámina (capítulo 20). El laminado en frío hace más resistente el metal y permite unas tolerancias más estrechas del espesor. Además, la superficie del material laminado en frío está libre de incrustaciones o copas de óxido y es generalmente superior a los correspondientes productos laminados en caliente. Estas características hacen de las láminas, tiras y rollos laminados en frío el material ideal para estampados, paneles exteriores y otros productos que van desde automóviles hasta utensilios y muebles de oficina.

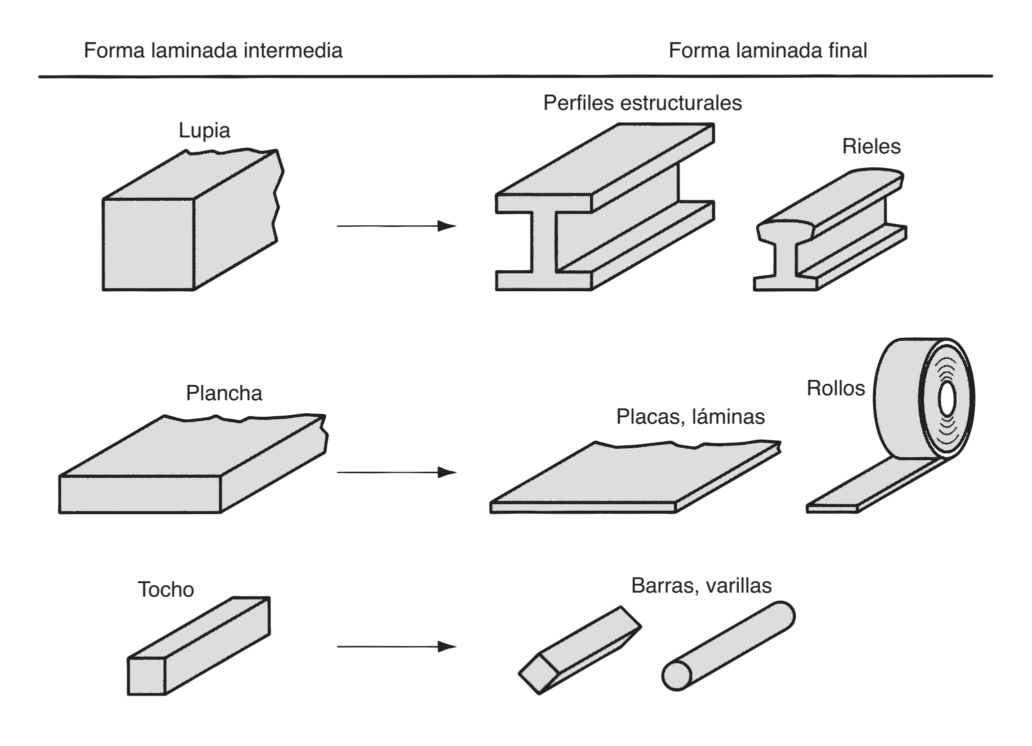


FIGURA 19.2 Algunos productos de acero hechos en molino de laminación.

Nota histórica 19.1 *Laminado.*

El laminado del oro y la plata por medios manuales data del siglo XIV. Leonardo da Vinci diseñó uno de los primeros molinos de laminación en 1480, pero es dudoso que su modelo se haya construido alguna vez. Alrededor del año 1600 se practicaba el laminado del plomo y del estaño en molinos manuales. Alrededor de 1700, el hierro ya se laminaba en caliente en Alemania, Bélgica, Francia, Inglaterra y Suecia. Estos molinos se usaron para hacer lámina a partir de barras de hierro. Antes de esta época, los únicos molinos laminadores que existían en las acerías eran molinos ranuradores, pares de rodillos opuestos con collares (discos cortantes) que cortaban el hierro y el acero en tiras angostas para hacer clavos y productos similares. Los molinos ranuradores no estaban diseñados para reducir el espesor del metal.

La práctica moderna de laminado data de 1783, cuando se expidió en Inglaterra una patente para un proceso que producía barras de hierro usando rodillos acanalados. La Revolución Industrial creó una tremenda demanda de productos de hierro y acero, estimulando el desarrollo de la laminación. El primer molino que laminaba rieles para ferrocarril se inició en Inglaterra en 1820. Las primeras vigas en I se laminaron en Francia en 1849. Además, el tamaño y la capacidad de los molinos de laminado plano se incrementaron de manera drástica durante este periodo.

El laminado es un proceso que requiere una fuente muy grande de potencia. Hasta el siglo XVIII se usaron las ruedas accionadas por agua para mover los molinos de laminación. Las máquinas de vapor incrementaron la capacidad de estos molinos de laminación hasta poco después de 1900, cuando los motores eléctricos remplazaron al vapor.

19.1.1 Laminado plano y su análisis

El laminado plano se ilustra en las figuras 19.1 y 19.3. Involucra el laminado de planchas, tiras, láminas y placas, piezas de trabajo de sección transversal rectangular con un ancho mayor que el espesor. En el laminado plano, se presiona el trabajo entre dos rodillos de manera que su espesor se reduce a una cantidad llamada ***draft***:

$$d = t_o - t_f \tag{19.1}$$

donde d = draft, mm (in); t_o = espesor inicial, in (mm); t_f = espesor final, mm (in). El draft se expresa algunas veces como una fracción del espesor del material inicial llamada ***reducción***:

$$r = \frac{d}{t_o} \tag{19.2}$$

donde r = reducción. Cuando se usa una serie de operaciones de laminado, la reducción se toma como la suma de los adelgazamientos dividida entre el espesor original.

Además de reducir el espesor, el laminado incrementa usualmente el ancho del material de trabajo. Esto se llama ***esparcido*** y tiende a ser más pronunciado con bajas relaciones entre ancho y espesor, así como con bajos coeficientes de fricción. Existe la conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen que entra:

$$t_o w_o L_o = t_f w_f L_f \tag{19.3}$$

donde w_o y w_f son los anchos de trabajo antes y después, mm (in), y L_o y L_f son las longitudes antes y después, mm (in). De igual forma, la velocidad volumétrica del flujo material antes y después debe ser la misma, así que las velocidades pueden relacionarse antes y después de la siguiente manera:

$$t_o w_o v_o = I_f w_f v_f \tag{19.4}$$

donde v_o y v_f son las velocidades de entrada y salida del material de trabajo.

Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo a lo largo de un arco de contacto definido por el ángulo θ. Cada rodillo tiene un radio R y su velocidad de rotación tiene una velocidad superficial v_r. Esta velocidad es mayor que la velocidad de entrada v_o y menor que la velocidad de salida v_f. Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos. Sin embargo, existe un punto a lo largo del arco donde la velocidad del trabajo iguala la velocidad del rodillo.

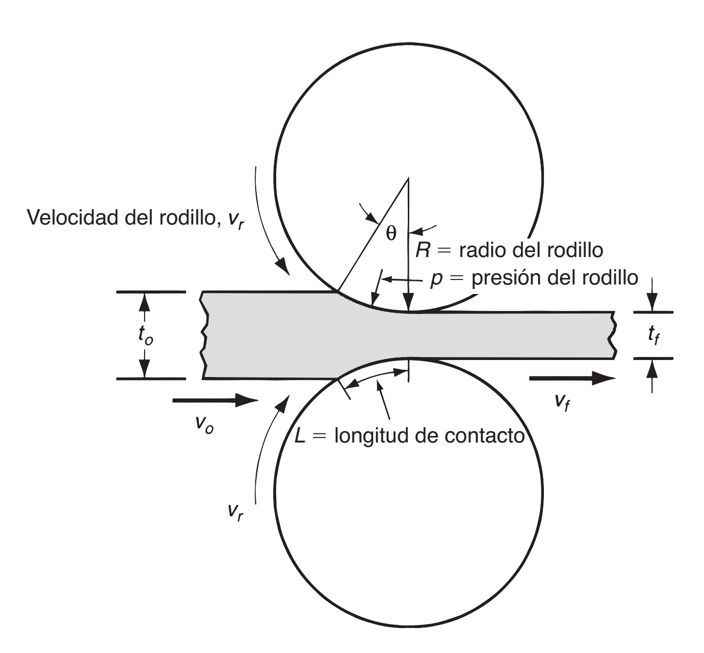


FIGURA 19.3 Vista lateral del laminado plano en la que se muestra el espesor antes y después, las velocidades de trabajo, el ángulo de contacto con los rodillos y otras características.

Este punto se llama ***punto de no deslizamiento***, también conocido como ***punto neutro.*** A cualquier lado de este punto, ocurren deslizamientos y fricción entre el rodillo y el material de trabajo. La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo puede medirse por medio del ***deslizamiento hacia delante***, un término que se usa en laminado y se define como:

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \tag{19.5}$$

donde s = deslizamiento hacia delante, v_f = velocidad final del trabajo (salida), m/s (ft/s); y v_r = velocidad de rodillo, m/s (ft/s).

El esfuerzo real experimentado por el trabajo laminado se basa en el espesor del material antes y después del laminado. En forma de ecuación,

$$\epsilon = \ln \frac{t_o}{t_f} \tag{19.6}$$

Se puede usar la deformación real para determinar el esfuerzo de fluencia promedio Y_f aplicado al material de trabajo en el laminado plano. De la ecuación 18.2 del capítulo anterior, se sabe que

$$\bar{Y}_f = \frac{K\epsilon^n}{1+n} \tag{19.7}$$

El esfuerzo de fluencia promedio será útil para calcular las estimaciones de fuerza y potencia en laminado.

La fricción se presenta en el laminado con cierto coeficiente de fricción, y la fuerza de compresión de los rodillos, multiplicada por este coeficiente de fricción, da por resultado una fuerza de fricción entre los rodillos y el trabajo. En el lado de la entrada del punto neutro la fuerza de fricción tiene una dirección; en el otro lado, tiene la dirección opuesta. Sin embargo, las dos fuerzas no son iguales. La fuerza de fricción es mayor en la entrada, de manera que la fuerza neta jala el trabajo a través de los rodillos. El laminado no sería posible sin estas diferencias. Hay un límite para el máximo draft posible que puede alcanzar el laminado plano con un coeficiente de fricción, dado por

$$d_{máx} = \mu^2 R \tag{19.8}$$

donde $d_{máx}$ = draft máximo, mm (in); μ = coeficiente de fricción y R = radio del rodillo, mm (in). La ecuación indica que si la fricción fuera cero, el adelgazamiento podría ser cero y esto haría imposible la operación de laminado.

El coeficiente de fricción en el laminado depende de varios factores, como lubricación, material de trabajo y temperatura de trabajo. En el laminado en frío el valor es alrededor de 0.1; en el trabajo en caliente debajo de la temperatura de cristalización, un valor típico es alrededor de 0.2; y en el laminado en caliente arriba de la temperatura de cristalización μ es alrededor de 0.4 [15]. El laminado en caliente se caracteriza frecuentemente por una condición llamada ***adherencia***, en la cual la superficie caliente del material de trabajo se pega a los rodillos sobre el arco de contacto. Esta condición ocurre a menudo en el laminado de aceros y aleaciones para alta temperatura. Cuando ocurre la adherencia, el coeficiente de fricción puede ser tan alto como 0.7. La consecuencia de la adherencia es que las capas superficiales del material de trabajo no se pueden mover a la misma velocidad que la velocidad del rodillo v_r; y debajo de la superficie la deformación es más severa a fin de permitir el paso de la pieza a través de la abertura entre los rodillos.

Dado un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, la fuerza de rodillo F requerida para mantener la separación entre los dos rodillos se puede calcular integrando la presión unitaria de laminado (mostrada como p en la figura 19.3) sobre el área de contacto rodillo-trabajo. Esto se puede expresar como sigue:

$$F = w\int_0^L p\,dL \tag{19.9}$$

donde F = fuerza de laminado N (lb); w = ancho del material de trabajo que se está laminando, mm (in), p = presión de laminado, MPa (lb/in^2); y L = longitud de contacto entre el rodillo y el trabajo, mm (in). La integración requiere dos términos separados, uno a cada lado del punto neutro. Las variaciones en la presión del rodillo a lo largo de la longitud de contacto son significativas. La figura 19.4 da una idea de esta variación. La presión alcanza un máximo en el punto neutro y se desvanece a cada lado de los puntos de entrada y salida. Al aumentar la fricción, la presión se incrementa al máximo relativo entre los valores de entrada y salida. Al disminuir la fricción el punto neutro se corre de la entrada hacia la salida a fin de mantener una fuerza neta que jale el material en la dirección del laminado. De otra forma, con una baja fricción, el material de trabajo podría deslizarse en lugar de pasar entre los rodillos.

Se puede calcular una aproximación de los resultados obtenidos por la ecuación 19.9 con base en el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el material de trabajo en la brecha entre los rodillos. Esto es,

$$F = \bar{Y}_f wL \tag{19.10}$$

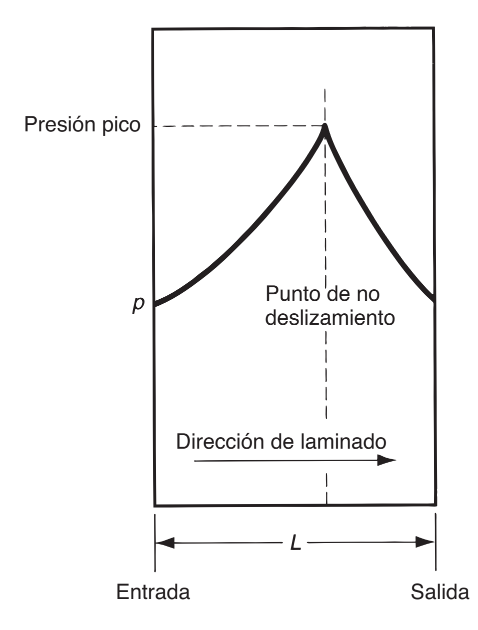


FIGURA 19.4 Variación típica de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la integración de la ecuación 19.9, es la fuerza de laminación F.

donde $\overline{Y}_f$ = esfuerzo de fluencia promedio de la ecuación 19.7 en MPa (lb/in^2); el producto wL es el área de contacto rodillo-trabajo, mm^2 (in^2). La longitud de contacto se puede aproximar mediante:

$$L = \sqrt{R(t_o - t_f)} \tag{19.11}$$

El momento de torsión en laminado se puede estimar suponiendo que la fuerza ejercida por los rodillos se centra en el trabajo, conforme pasa entre ellos y actúa con un brazo de palanca de la mitad de la longitud de contacto L. Entonces, el momento de torsión para cada rodillo es:

$$T = 0.5\ FL \tag{19.12}$$

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del momento de torsión y la velocidad angular. La velocidad angular es $2N$, donde N = velocidad rotacional del rodillo. Por lo tanto, la potencia en cada rodillo es $2NT$. Al sustituir la ecuación 19.12 por el momento de torsión en esta expresión para la potencia, y al duplicar el valor, dado que un molino de laminado posee dos rodillos, se obtiene la siguiente expresión:

$$P = 2\pi NFL$$

donde P = potencia, J/s o W (in-lb/min); N = velocidad de rotación 1/s (rev/min); F = fuerza de laminado, N (lb); L = longitud de contacto, m (in).

EJEMPLO 19.1
Laminado plano

Una tira con un ancho de 300 mm y 25 mm de espesor se alimenta a través de un molino laminador con dos rodillos de 250 mm de radio cada uno. El espesor de material de trabajo se reduce a 22 mm en un paso, a una velocidad de rodillo de 50 rev/min. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por K = 275 MPa y n = 0.15 y se supone que el coeficiente de fricción entre los rodillos y el trabajo es de 0.12. Determine si la fricción es suficiente para realizar la operación de laminado. Si es así, calcule la fuerza de laminado, el momento de torsión y la potencia en caballos de fuerza.

Solución: El draft que se intenta en esta operación de laminado es:

$$d = 25 - 22 = 3 \text{ mm}$$

De la ecuación 19.8, el draft máximo posible para el coeficiente de fricción dado es:

$$d_{\text{máx}} = (0.12)^2(250) = 3.6 \text{ mm}$$

Como el draft permisible máximo excede la reducción que se pretende, es posible la operación de laminado. Para calcular la fuerza de laminado se necesita la longitud de contacto L y el esfuerzo de fluencia promedio $\overline{Y}_f$. La longitud de contacto está dada por la ecuación 19.11:

$$L = \sqrt{250(25 - 22)} = 27.4 \text{ mm}$$

$\overline{Y}_f$ se determina por la deformación real:

$$\epsilon = \ln \frac{25}{22} = 0.128$$

La fuerza de laminado se determina por la ecuación 19.10:

$$F = 175.7(300)(27.4) = 1\,444\,786 \text{ N}$$

El momento de torsión requerido para mover cada rodillo está dado por la ecuación 19.12:

$$T = 0.5(1\,444\,786)(27.4)(10^{-3}) = 19\,786 \text{ N-m}$$

y la potencia se obtiene de la ecuación 19.13:

$$P = 2\pi(50)(1\,444\,786)(27.4)(10^{-3}) = 12\,432\,086 \text{ N-m/min} = 207\,201 \text{ N-m/s(W)}$$

Convirtiendo esto a caballos de fuerza (un caballo de fuerza = 745.7 W):

$$HP = \frac{207\,201}{745.7} = 278 \text{ hp}$$

■

En este ejemplo se puede observar que se requieren grandes fuerzas y potencias para el laminado. La inspección de las ecuaciones 19.10 y 19.13 indica que puede reducirse la fuerza y la potencia para laminar una tira de ancho y material dados, por cualquiera de los siguientes medios: 1) uso de laminado en caliente en lugar de laminado en frío para reducir la resistencia y el endurecimiento por deformación (K y n) del material de trabajo, 2) reducción del draft en cada paso, 3) utilización de un menor radio en el rodillo R para reducir la fuerza y 4) utilizando menor velocidad de laminación N para reducir la potencia.

19.1.2 Laminado de perfiles

En el laminado de perfiles, el material de trabajo se deforma para generar un contorno en la sección transversal. Los productos hechos por este procedimiento incluyen perfiles de construcción como vigas en I, en L y canales en U; rieles para vías de ferrocarril y barras redondas y cuadradas, así como varillas (véase la figura 19.2). El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada.

La mayoría de los principios que se aplican en el laminado plano son también aplicables al laminado de perfiles. Los rodillos formadores son más complicados; y el material inicial, de forma usualmente cuadrada, requiere una transformación gradual a través de varios rodillos para alcanzar la sección final. El diseño de la secuencia de las formas intermedias y los correspondientes rodillos se llama ***diseño de pases de laminación.*** Su meta es lograr una deformación uniforme a través de las secciones transversales de cada reducción. De otra forma, ciertas porciones de trabajo se reducen más que otras, causando una mayor elongación en estas secciones. La consecuencia de una reducción no uniforme puede ser torceduras y agrietamiento del producto laminado. Se utiliza rodillos horizontales y verticales para lograr una reducción consistente del material de trabajo.

19.1.3 Molinos laminadores

Se dispone de varias configuraciones de molinos de laminación que manejan una variedad de aplicaciones y problemas técnicos en los procesos de laminación. El molino de laminación básico consiste en dos rodillos opuestos y se denomina molino de laminación de ***dos rodillos***, el cual se muestra en la figura 19.5*a*). Los rodillos en estos molinos tienen diámetros que van de 0.6 a 1.4 m (2.0 a 4.5 ft). La configuración de rodillos puede ser reversible o no reversible. En el ***molino no reversible*** los rodillos giran siempre en la misma dirección y el trabajo siempre pasa a través del mismo lado. El ***molino reversible*** permite la rotación de los rodillos en ambas direcciones, de manera que el trabajo puede pasar a través de cualquier dirección. Esto permite una serie de reducciones que se hacen a través del mismo juego de rodillos, pasando simplemente el trabajo varias veces desde direcciones opuestas. La desventaja de la configuración reversible es la cantidad significativa de movimiento angular debido a la rotación de grandes rodillos, y los problemas técnicos asociados a la reversibilidad de la dirección.

En la figura 19.5 se ilustran algunas configuraciones alternas. En la configuración de ***tres rodillos***, figura 19.5*b*), hay tres rodillos en una columna vertical y la dirección de rotación de cada rodillo permanece sin cambio. Para lograr una serie de reducciones se puede pasar el material de trabajo en cualquier dirección, ya sea elevando o bajando la tira

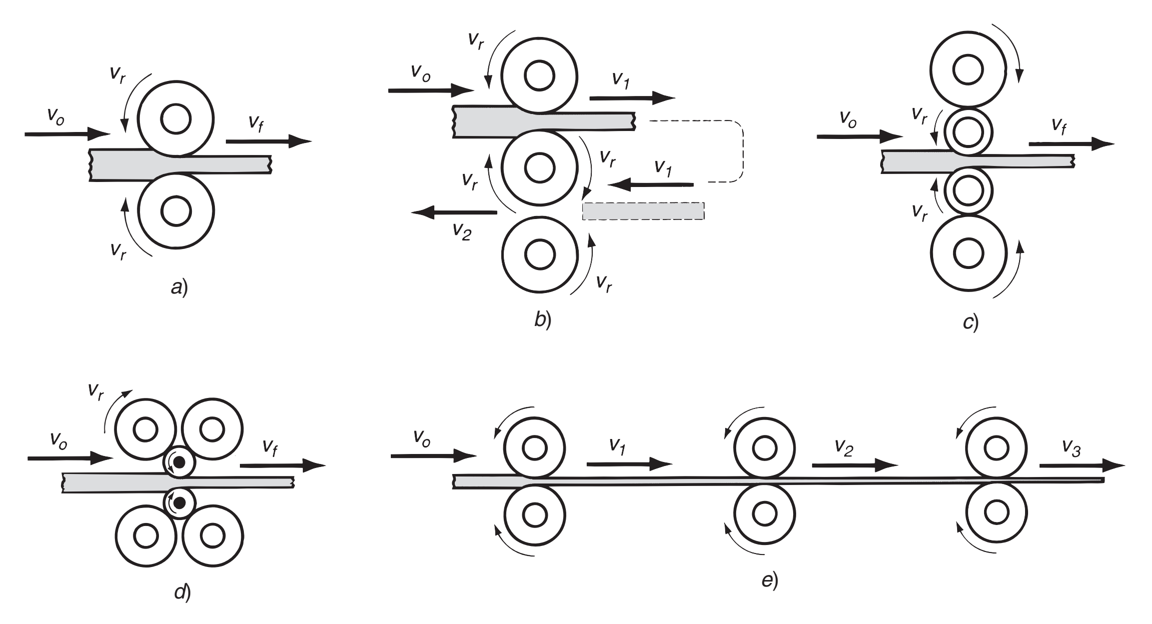


FIGURA 19.5 Varias configuraciones de molinos de laminación: *a*) dos rodillos, *b*) tres rodillos, *c*) cuatro rodillos, *d*) molino en conjunto y *e*) molino de rodillos en tándem.

después de cada paso. El equipo en un molino de tres rodillos se vuelve más complicado debido al mecanismo elevador que se necesita para elevar o bajar el material de trabajo.

Como indican las ecuaciones anteriores, se gana algunas ventajas al reducir el diámetro de los rodillos. La longitud de contacto entre los rodillos y el trabajo se reduce con un menor radio de los rodillos y esto conduce a fuerza más bajas, menor momento de torsión y menor potencia. En los molinos de ***cuatro rodillos*** se usan dos rodillos de diámetro menor para hacer contacto con el trabajo y dos rodillos detrás como respaldo, como se muestra en la figura 19.5*c*). Debido a las altas fuerzas de laminado, los rodillos menores podrían desviarse elásticamente con el paso de la laminación, si no fuera por los rodillos más grandes de respaldo que los soportan. Otra configuración que permite el uso de rodillos menores contra el trabajo es el ***molino en conjunto o racimo***, figura 19.5*d*).

Para lograr altas velocidades de rendimiento en los productos estándar se usa frecuentemente un ***molino de rodillos en tándem***. Esta configuración consiste en una serie de bastidores de rodillos, como se aprecia en la figura 19.5*e*). Aunque sólo se muestran tres bastidores en el diagrama, un molino laminador en tándem puede tener ocho o diez pares de rodillos, y cada uno realiza una reducción en el espesor o un refinamiento en la forma del material de trabajo que pasa entre ellos. A cada paso de laminación se incrementa la velocidad, haciendo significativo el problema de sincronizar las velocidades de los rodillos en cada etapa.

Los molinos en tándem modernos se utilizan con frecuencia en operaciones de colada continua (sección 7.2.2). Estas instalaciones logran un alto grado de continuidad en los procesos que se requieren para transformar las materias primas iniciales en productos finales. Las ventajas incluyen: eliminación de fosas de recalentado, reducción del espacio en las instalaciones y tiempos de manufactura más cortos. Estas ventajas técnicas se traducen en beneficios económicos para aquellos molinos que pueden realizar la colada continua y la laminación.

19.2 OTROS PROCESOS DE DEFORMACIÓN RELACIONADOS CON EL LAMINADO

Algunos otros procesos de deformación volumétrica usan rodillos para formar las piezas de trabajo; estas operaciones incluyen laminado de cuerdas, laminado de anillos, laminado de engranes y perforado de rodillos.

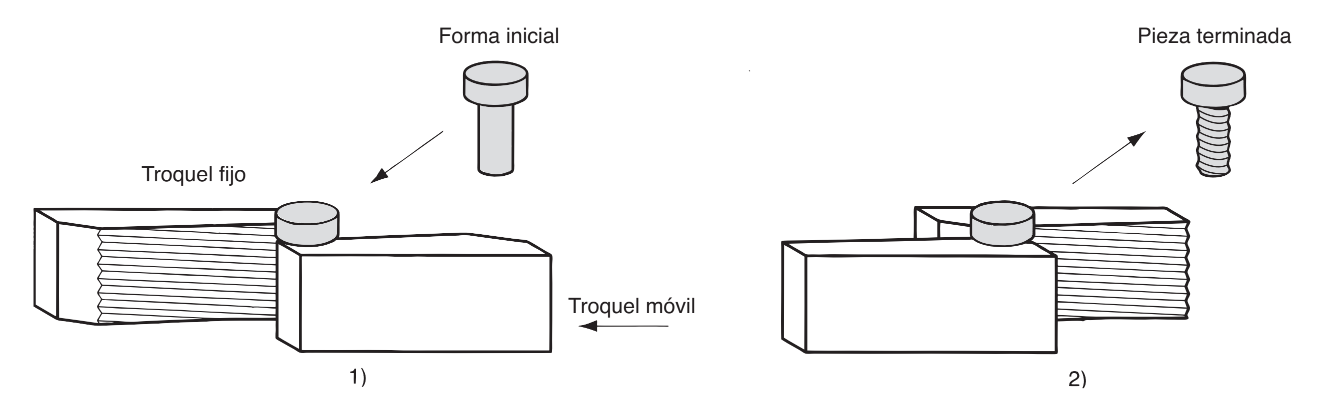


FIGURA 19.6 Laminado de cuerdas con troqueles planos: 1) inicio del ciclo y 2) fin del ciclo.

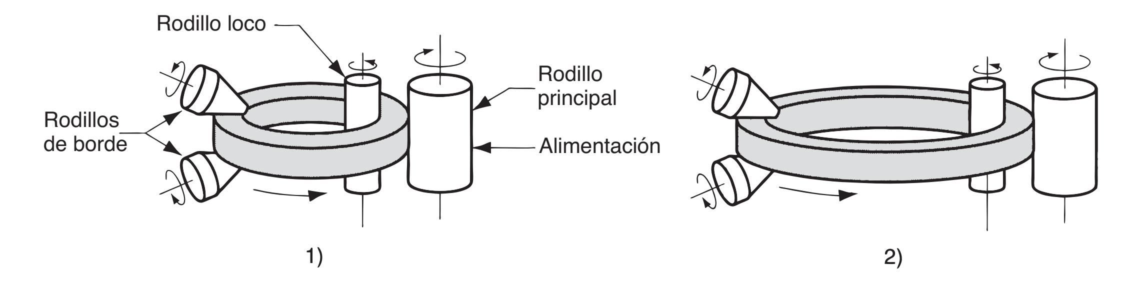
Laminado de cuerdas El laminado de cuerdas se usa para formar cuerdas en piezas cilíndricas mediante su laminación entre dos troqueles. Es el proceso comercial más importante para producción masiva de componentes con cuerdas externas (pernos y tornillos, por ejemplo). El proceso competidor es el maquinado de cuerdas (sección 22.1.2). La mayoría de las operaciones de laminado de cuerdas se realiza por trabajo en frío, utilizando máquinas laminadoras de cuerdas. Estas máquinas están equipadas con troqueles especiales que determinan el tamaño y forma de la cuerda; los troqueles son de dos tipos: 1) troqueles planos que se mueven alternadamente entre sí, como se ilustra en la figura 19.6, y 2) troqueles redondos, que giran relativamente entre sí para lograr la acción de laminado.

Las velocidades de producción en el laminado de cuerdas pueden ser muy altas; su capacidad alcanza hasta 8 piezas por segundo para pernos y tornillos pequeños. Pero la velocidad no es la única ventaja respecto al maquinado; existen otras como son: 1) mejor utilización del material, 2) cuerdas más fuertes debido al endurecimiento por trabajo, 3) superficies más lisas, 4) mejor resistencia a la fatiga debido a los esfuerzos por compresión que se introducen durante el laminado.

Laminado de anillos El laminado de anillos es un proceso de deformación que lamina las paredes gruesas de un anillo para obtener anillos de paredes más delgadas, pero de un diámetro mayor. La figura 19.7 ilustra el proceso antes y después. Conforme el anillo de paredes gruesas se comprime, el material se alarga, ocasionando que el diámetro del anillo se agrande. El laminado de anillos se aplica usualmente en procesos de trabajo en caliente para anillos grandes y en procesos de trabajo en frío para anillos pequeños.

Las aplicaciones de laminado de anillos incluyen collarines para cojinetes de balines y rodillos, llantas de acero para ruedas de ferrocarril y cinchos para tubos, recipientes a presión y máquinas rotatorias. Las paredes de los anillos no se limitan a secciones rectangulares; el proceso permite la laminación de formas más complejas. Las ventajas del laminado de anillos sobre otros métodos para fabricar las mismas piezas son: el ahorro de

FIGURA 19.7 Laminación de anillos que se usa para reducir el espesor e incrementar su diámetro: 1) inicio y 2) proceso terminado.



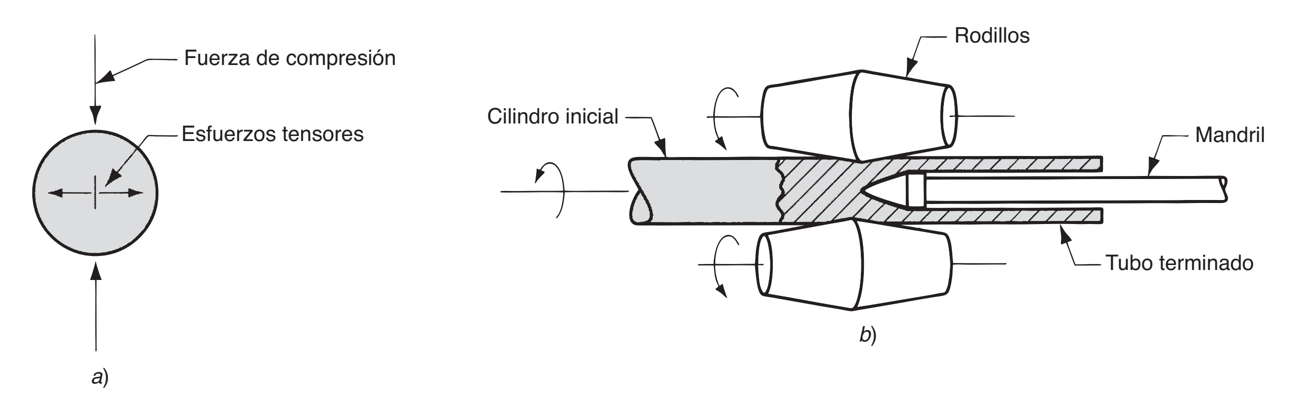


FIGURA 19.8 Perforación de rodillos: *a*) formación de esfuerzos internos y de la cavidad por compresión de la pieza cilíndrica y *b*) disposición del molino de laminación Mannesmann para producir tubo sin costura.

materias primas, la orientación ideal de los granos para la aplicación y el endurecimiento a través del trabajo en frío.

Laminado de engranes Éste es un proceso de formado en frío que produce ciertos engranes. La industria automotriz es un importante usuario de estos productos. La instalación para el laminado de engranes es similar al laminado de cuerdas, excepto porque las características de deformación de los cilindros o discos se orientan paralelamente a su eje (o a un ángulo en el caso de engranes helicoidales), en lugar de la espiral del laminado de cuerdas. Las ventajas del laminado de engranes, comparadas con el maquinado, son similares a las ventajas en el laminado de cuerdas: altas velocidades de producción, mejor resistencia a la fatiga y menos desperdicio de material.

Perforado de rodillos Es un proceso especializado de trabajo en caliente para hacer tubos sin costura de paredes gruesas. Utiliza dos rodillos opuestos y por tanto se agrupa entre los procesos de laminado. El proceso se basa en el principio de que al comprimir un sólido cilíndrico sobre su circunferencia, como en la figura 19.8*a*), se generan altos esfuerzos de tensión en su centro. Si la compresión es lo suficientemente alta, se forma una grieta interna. Este principio se aprovecha en el perforado de rodillos mediante la disposición que se muestra en la figura 19.8*b*). Los esfuerzos de compresión se aplican sobre el tocho sólido cilíndrico por dos rodillos, cuyos ejes se orientan en pequeños ángulos (alrededor de 6º) respecto al eje del tocho; de esta manera la rotación tiende a jalar el tocho a través de los rodillos. Un mandril se encarga de controlar el tamaño y acabado de la perforación creada por la acción. Se usan los términos ***perforado rotatorio de tubos*** y ***proceso Mannesmann*** para esta operación en la fabricación de tubos.

19.3 FORJADO

El ***forjado*** es un proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos troqueles, usando impacto o presión gradual para formar la pieza. Es la operación más antigua para formado de metales y se remonta quizá al año 5000 a.C. (véase la nota histórica 19.2). En la actualidad el forjado es un proceso industrial importante mediante el cual se hace una variedad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones. Estos componentes incluyen cigüeñales y bielas para motores de combustión interna, engranes, componentes estructurales para aviación y piezas para turbinas y motores de propulsión. Además, las industrias del acero y de otros

metales básicos usan el forjado para fijar la forma básica de grandes componentes que luego se maquinan para lograr su forma final y dimensiones definitivas.

Nota histórica 19.2 *Forjado.*

El proceso de forjado se remonta a los primeros registros escritos de la raza humana, hace cerca de 7 000 años. Hay evidencias de que el forjado era usado en el antiguo Egipto, Grecia, Persia, India, China y Japón para hacer armas, joyería y otros implementos. En esos tiempos, a los artesanos en el arte de la forja se les tenía en alta estima.

En la antigua Creta se usaban placas de piedra labrada como troqueles de impresión en el martillado del oro y la plata, alrededor de 1600 a. C. Esto evolucionó a la fabricación de monedas por un proceso similar hacia el año 800 a. C. En Roma se usaron troqueles de impresión más complicados por el año 200 d. C. El negocio de la herrería permaneció relativamente sin cambios hasta que se introdujo el martinete de forja con pistón guiado a fines del siglo XVIII. Este desarrollo trajo la práctica de la forja a la era industrial.

El forjado se lleva a cabo de diversos modos. Una manera de clasificar las operaciones de forja es mediante la temperatura de trabajo. La mayoría de las operaciones de forja se realiza en caliente (por arriba o por debajo de la temperatura de cristalización), dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo; sin embargo, el forjado en frío es muy común para ciertos productos. La ventaja del forjado en frío es que incrementa la resistencia que resulta del endurecimiento por deformación del componente.

En el forjado se aplica la presión por impacto o en forma gradual. La diferencia depende más del tipo de equipo usado que de las diferencias en la tecnología de los procesos. Una máquina de forjado que aplica cargas de impacto se llama ***martinete de forja***, mientras que la que aplica presión gradual se llama ***prensa de forjado***.

Otra diferencia entre las operaciones de forjado es el grado en que los troqueles restringen el flujo del metal de trabajo. Atendiendo a esta clasificación, hay tres tipos de operaciones de forjado: *a*) forjado en troquel abierto, *b*) forjado en troquel impresor y *c*) forjado sin rebaba. Los diagramas de estos tres tipos se presentan en la figura 19.9. En el ***forjado en troquel abierto***, el trabajo se comprime entre dos troqueles planos (o casi planos), permitiendo que el metal fluya sin restricciones en una dirección lateral respecto a las superficies del troquel. En el ***forjado en troquel impresor***, las superficies del troquel contienen una forma o impresión que se imparte al material de trabajo durante la compresión, restringiendo significativamente el flujo de metal. En este tipo de operación, una parte del metal fluye más allá del troquel impresor formando una ***rebaba***, como se muestra en la figura. La rebaba es un exceso de metal que debe recortarse más tarde. En el ***forjado sin rebaba***, el troquel restringe completamente el material de trabajo dentro de la cavidad y no se produce rebaba excedente. Es necesario controlar estrechamente el volumen de la pieza inicial para que iguale al volumen de la cavidad del troquel.

19.3.1 Forjado en troquel abierto

El caso más simple de forjado en troquel abierto consiste en comprimir una pieza de sección cilíndrica entre dos troqueles planos, muy semejante a una prueba de la compresión (sección 3.1.2). Esta operación de forjado conocida como ***recalcado*** o ***forjado para recalcar***, reduce la altura del trabajo e incrementa su diámetro.

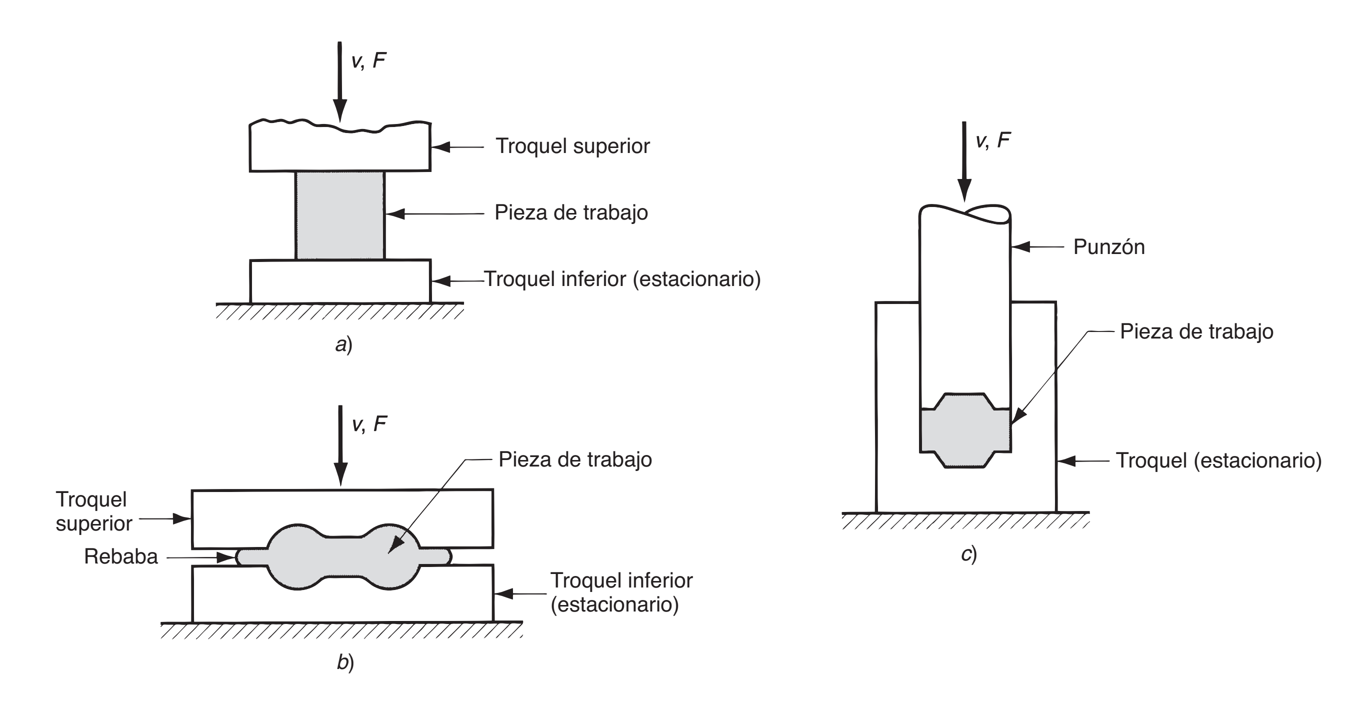
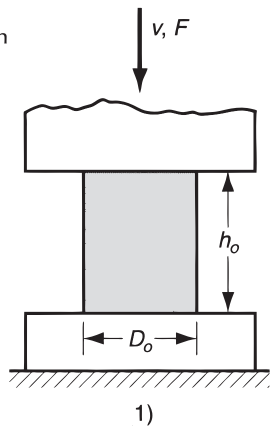


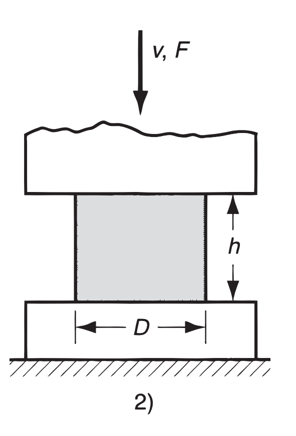
FIGURA 19.9 Tres tipos de operación de forja ilustrados por diagramas de sección transversal: *a*) forjado en troquel abierto, *b*) forjado en troquel impresor y *c*) forjado sin rebaba.

Análisis del forjado en troquel abierto Si el forjado en troquel abierto se lleva a cabo bajo condiciones ideales, sin fricción entre el trabajo y la superficie del troquel, ocurre una deformación homogénea y el flujo radial de material es uniforme a lo largo de su altura, como se representa en la figura 19.10. Bajo condiciones ideales, la deformación real que experimenta el material durante el proceso se puede determinar por:

$$\epsilon = \ln \frac{h_o}{h} \tag{19.14}$$

donde h_o = altura inicial de trabajo, mm (in); y h = altura de un punto intermedio en el proceso, mm (in). Al final de la carrera de compresión, h = su valor final h_f, y la deformación real alcanza su máximo valor.





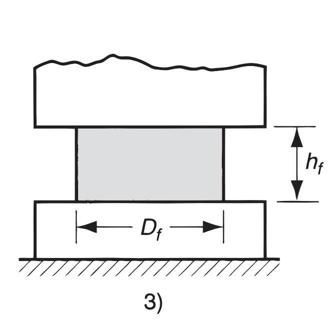


FIGURA 19.10 Deformación homogénea de una pieza de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales en una operación de forjado en troquel abierto: 1) inicio del proceso con la pieza de trabajo a su longitud y diámetro originales, 2) compresión parcial y 3) tamaño final.

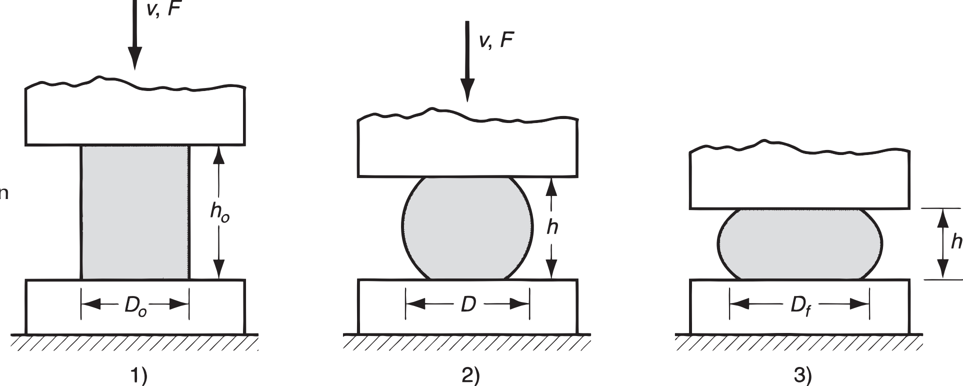


FIGURA 19.11 Deformación real de una pieza de trabajo cilíndrica en forjado en troquel abierto en la que se muestra un abarrilamiento pronunciado: 1) inicio del proceso, 2) deformación parcial y 3) forma final.

Se puede estimar la fuerza para ejecutar el recalcado. Se puede obtener la fuerza requerida para continuar la compresión a una altura dada h durante el proceso, multiplicando el área correspondiente de la sección transversal por el esfuerzo de fluencia:

$$F = Y_f A \tag{19.15}$$

donde F = fuerza, lb (N); A = área de la sección transversal de la pieza, mm² (in²); Y_f = esfuerzo de fluencia correspondiente a la deformación dada por la ecuación 19.14, en MPa (lb/in²). El área A se incrementa continuamente al reducirse la altura durante la operación. El esfuerzo de fluencia Y_f se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo, excepto cuando el metal es perfectamente plástico (por ejemplo, trabajo en caliente). En este caso, el exponente de endurecimiento por deformación $n = 0$, y el esfuerzo de fluencia Y_f iguala a la resistencia de fluencia del metal Y. La fuerza alcanza un valor máximo al final de la carrera de forjado, donde el área y el esfuerzo de fluencia llegan a su valor más alto.

Una operación real de recalcado no ocurre exactamente como se muestra en la figura 19.10, debido a que la fricción se opone al flujo de metal en la superficie de los troqueles. Esto crea un efecto de abultamiento en forma de barril, llamado abarrilamiento, que se muestra en la figura 19.11. Cuando se realiza un trabajo en caliente con troqueles fríos, el abarrilamiento es más pronunciado. Esto se debe a un coeficiente de fricción más alto, típico del trabajo en caliente, y a la transferencia de calor en la superficie del troquel y sus cercanías, lo cual enfría el metal y aumenta su resistencia a la deformación. El metal más caliente se encuentra en medio de la pieza y fluye más fácilmente que el material más frío de los extremos. El efecto se acentúa al aumentar la relación entre el diámetro y la altura de la pieza, debido a la mayor área de contacto en la interfaz troquel-trabajo.

Todos estos factores originan que la fuerza de recalcado sea más grande que la pronosticada por la ecuación 19.15. Se puede aplicar un factor de forma a la ecuación 19.15 para aproximar los efectos del cociente D/h y la fricción:

$$F = K_f Y_f A \tag{19.16}$$

donde F, Y_f y A tienen las mismas definiciones que en la ecuación anterior; y K_f es el factor de forma del forjado, definido como:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h} \tag{19.17}$$

donde μ = coeficiente de fricción; D = diámetro de la pieza de trabajo o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie de troquel, mm (in); y h = altura de la pieza, mm (in).

EJEMPLO 19.2
Forjado en troquel abierto

Una pieza de trabajo cilíndrica se sujeta a una operación de forjado para recalcar en frío. La pieza inicial tiene 75 mm de altura y 50 mm de diámetro. En la operación, su altura se

reduce a 36 mm. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por $K = 350$ MPa y $n = 0.17$. Suponga un coeficiente de fricción de 0.1. Determine la fuerza conforme empieza el proceso, a alturas intermedias de 62 mm, 49 mm y a la altura final de 36 mm.

Solución: Volumen de la pieza de trabajo $V = 75p(502/4) = 147\ 262\ mm^3$. En el momento en que hace contacto con el troquel superior, $h = 75$ mm y la fuerza $F = 0$. Al principio de la fluencia, h es ligeramente menor que 75 mm, y se supone que la deformación = 0.002, en la cual el esfuerzo de fluencia es:

$$Y_f = K\epsilon^n = 350(0.002)^{0.17} = \text{MPa}$$

El diámetro es todavía aproximadamente $D = 50$ mm, y el área $A = \pi(50^2/4) = 1\ 963.5$ mm^2. Para estas condiciones el factor de ajuste K_f se calcula como

$$K_f = 1 + \frac{0.4(0.1)(50)}{75} = 1.027$$

La fuerza de forjado es

$$F = 1.027(121.7)(1\ 963.5) = 245\ 410\ \text{MPa}$$

A una $h = 62$ mm,

$$\epsilon = \ln\frac{75}{62} = \ln(1.21) = 0.1904$$

$$Y_f = 3\ 500(0.1904)^{17} = 264.0\ \text{MPa}$$

Si se supone un volumen constante y no se toma en cuenta el abarrilamiento,

$$A = 147\ 262 / 62 = 2\ 375.2\ \text{mm}^2 \quad \text{y} \quad D = 55.0\ \text{mm}$$

$$K_f = 1 + \frac{0.4(0.1)(55)}{62} = 1.035$$

$$F = 1.035(264)(2\ 375.2) = 649.303\ \text{N}$$

De igual manera, a una $h = 49$ mm, $F = 995.642$ N. Y a $h = 36$ mm, $F = 1\ 467.422$ N. La curva carga versus carrera de la figura 19.12 se construyó con los valores de este ejemplo. ■

Práctica del forjado en troquel abierto El forjado caliente en troquel abierto es un proceso industrial importante. Las formas generadas por operaciones en troquel abierto son simples, como flechas, discos y anillos. Los troqueles en algunas aplicaciones tienen superficies con ligeros contornos que ayudan a formar el material de trabajo. Éste, además, debe manipularse frecuentemente (girándolo en cada paso, por ejemplo) para efectuar los cambios de forma requeridos. La habilidad del operador es un factor importante para el éxito de estas operaciones. Un ejemplo de forjado en troquel abierto en la industria del acero es el formado de grandes lingotes cuadrados para convertirlos en secciones redondas. Las operaciones de forja en troquel abierto producen formas rudimentarias que necesitan operaciones posteriores para refinar las piezas a sus dimensiones y forma final. Una contribución importante del forjado en caliente en troquel abierto es la creación de un flujo de granos y de una estructura metalúrgica favorable en el metal.

Las operaciones clasificadas en la categoría de troquel abierto son operaciones relacionadas y pueden realizarse con troqueles convexos, con troqueles cóncavos y por secciones, como se ilustra en la figura 19.13. El ***forjado con troqueles convexos (fullering)*** es una operación de forja que se utiliza para reducir la sección transversal y redistribuir el metal en una pieza de trabajo, como preparación para operaciones posteriores de formado con forja. Se realiza con troqueles de superficies convexas. Las cavidades del troquel para el forjado con troqueles convexos se diseñan frecuentemente con múltiples cavidades de impresión, de manera que la barra inicial pueda formarse toscamente antes del formado

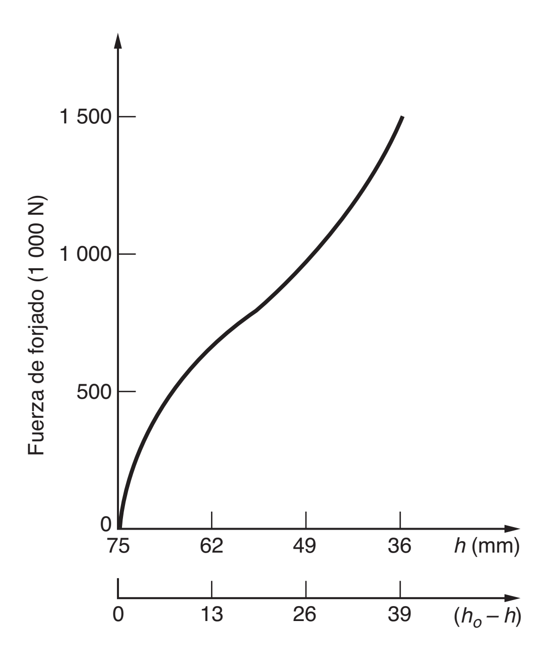


FIGURA 19.12 Fuerza de recalcado en función de la altura h y de la reducción de altura $(h_o - h)$. A esta gráfica se le llama algunas veces curva carga-colada.

final. El ***forjado con troqueles cóncavos*** es similar al anterior, excepto porque los troqueles tienen superficies cóncavas.

Una operación de ***forjado por secciones*** consiste en una secuencia de compresiones forjadas a lo largo de una pieza de trabajo para reducir su sección transversal e incrementar su longitud. Se usa en la industria siderúrgica para producir lupias y planchas a partir de lingotes fundidos; en la operación se utilizan troqueles abiertos con superficies planas o con un ligero contorno. Con frecuencia se usa el término ***forjado incremental*** para este proceso.

19.3.2 Forjado con troquel impresor

El ***forjado con troquel impresor***, llamado algunas veces ***forjado en troquel cerrado***, se realiza con troquel que tiene la forma inversa de la requerida para la pieza. Este proceso se ilustra en una secuencia de tres pasos en la figura 19.14. La pieza de trabajo inicial se muestra como una pieza cilíndrica similar a la de las operaciones previas en troquel abierto. Al cerrarse el troquel y llegar a su posición final, el metal fluye más allá de la cavidad del troquel y forma una rebaba en la pequeña abertura entre las placas del troquel. Aunque la rebaba se debe recortar después, tiene realmente una función importante en el forjado por impresión, ya que cuando ésta empieza a formarse en el hueco del troquel, la fricción se opone a que el metal siga fluyendo hacia la abertura, y de esta manera fuerza al material de trabajo a permanecer en la cavidad. En el forjado en caliente, la restricción del flujo de metal es mayor debido a que la rebaba delgada se enfría rápidamente contra las placas del troquel, incrementando la resistencia a la deformación. La restricción del flujo de metal en la abertura hace que las presiones de compresión se incrementen significativamente, forzando al material a llenar los detalles algunas veces intrincados de la cavidad del troquel; con esto se obtiene un producto de alta calidad.

Con frecuencia se requieren varios pasos de formado en el forjado con troquel impresor para transformar la forma en blanco inicial en la forma final deseada. Para cada paso se necesitan cavidades separadas. Los pasos iniciales se diseñan para redistribuir el metal en la pieza de trabajo y conseguir así una deformación uniforme y la estructura metálica requerida en las etapas subsecuentes. Los últimos pasos le dan el acabado a la pieza final. Además, cuando se usa martinete, se pueden requerir varios golpes de martillo para

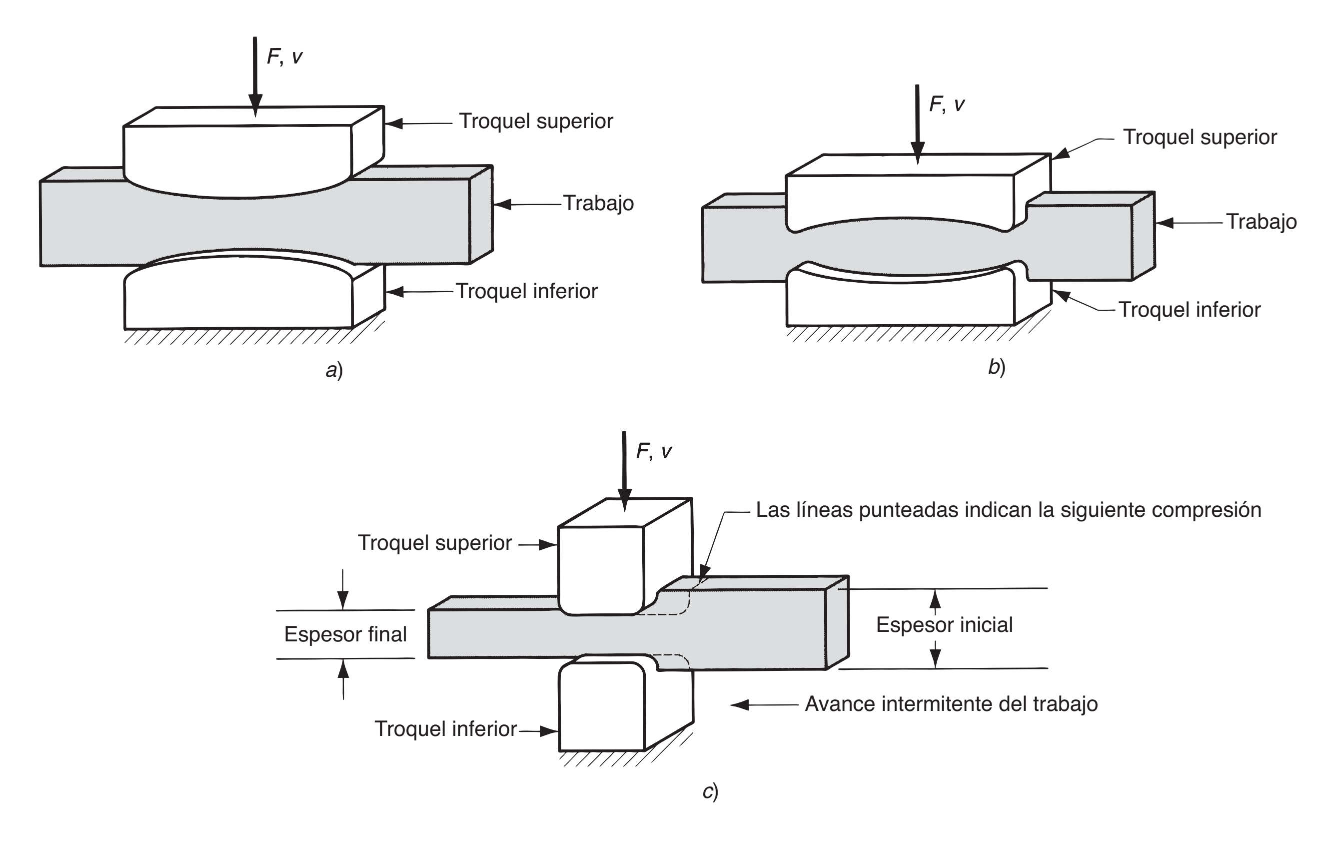


FIGURA 19.13 Varias operaciones de forjado en troquel abierto: *a*) con troqueles convexos, *b*) con troqueles cóncavos y *c*) por secciones.

cada paso. Cuando el forjado con martinete se hace a mano, como sucede a menudo, se requiere considerable habilidad del operador para lograr resultados consistentes en condiciones adversas.

Debido a la formación de rebaba en el forjado con troquel impresor y a las formas más complejas de las piezas hechas con estos troqueles, las fuerzas en este proceso son considerablemente más grandes y más difíciles de analizar que en el forjado en troquel abierto. Con frecuencia se usan fórmulas y factores de diseño relativamente simples para estimar las fuerzas en el forjado con troquel impresor. La fórmula de la fuerza es la misma

FIGURA 19.14 Secuencia en el forjado con troquel impresor: 1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo en bruto, 2) compresión parcial y 3) cerradura final de los troqueles, ocasionando la formación de rebaba entre las placas del troquel.

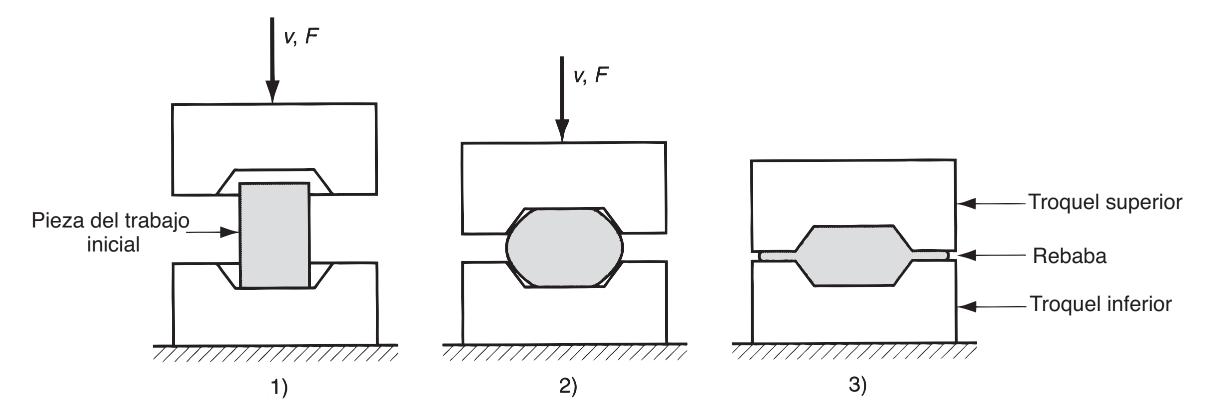


TABLA 19.1 Valores típicos de K_f para varias formas de la pieza en forjado con troquel impresor y en forjado sin rebabas.

Forma de la pieza:	K_f	Forma de la pieza:	K_f
Forjado con troquel impresor		Forjado sin rebaba:	
Formas simples con rebaba	6.0	Acuñado (superficies superior e inferior)	6.0
Formas complejas con rebaba	8.0	Formas complejas	8.0
Formas muy complejas con rebaba	10.0		

de la ecuación 19.16 para el forjado en troquel abierto, pero su interpretación es ligeramente diferente:

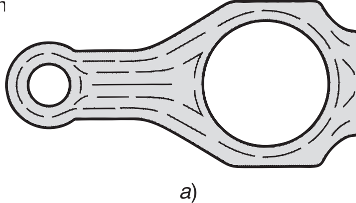
$$F = K_f Y_f A \tag{19.18}$$

donde F = fuerza máxima en la operación, N (lb); A = área proyectada de la pieza, incluida la rebaba, mm^2 (in^2); Y_f = esfuerzo de fluencia del material, MPa (lb/in^2); y K_f = factor de forma del forjado. En el forjado en caliente, el valor apropiado de Y_f es la resistencia a la fluencia del metal a temperatura elevada. En otros casos, la selección del valor apropiado del esfuerzo de fluencia es difícil porque para las formas complejas la deformación varía a través de la pieza de trabajo. En la ecuación 19.18, K_f es un factor con el que se intenta tomar en cuenta el incremento de la fuerza requerida para forjar formas complejas. La tabla 19.1 muestra la escala de valores de K_f para diferentes formas de la pieza. Obviamente, el problema, al especificar el valor apropiado de K_f para una forma dada de trabajo, limita la precisión de la estimación de la fuerza.

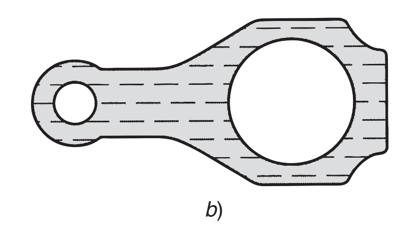
La ecuación 19.18 se aplica a la fuerza máxima durante la operación, ya que ésta determinará la capacidad requerida de la prensa o martinete que se use en la operación. La fuerza máxima se alcanza al final de la carrera o golpe de forjado donde el área proyectada es más grande y la fricción es máxima.

El forjado con troquel impresor no tiene tolerancias estrechas de trabajo y frecuentemente se requiere el maquinado para lograr la precisión necesaria. El proceso de forjado genera la configuración geométrica básica de la pieza y el maquinado realiza los acabados de precisión que se requieren en algunas porciones de la pieza (por ejemplo, perforaciones, cuerdas y superficies que deben coincidir con otros componentes). Las ventajas del forjado sobre el maquinado completo de la pieza son: velocidades de producción más altas, conservación del metal, mayor resistencia y orientación más favorable de los granos de metal. En la figura 19.15 se ilustra una comparación del flujo granular en el forjado y en el maquinado.

Las mejoras en la tecnología del forjado con troquel impresor han tenido como resultado la capacidad de producir forjados con secciones más delgadas, formas más complejas, reducción drástica de los requerimientos de ahusamiento en los troqueles, tolerancias más estrechas y la virtual eliminación de tolerancias al maquinado. Los procesos de forjado con estas características se conocen como ***forjado de precisión***. Los metales más comunes que se usan en el forjado de precisión son el aluminio y el titanio. En la figura 19.16 se muestra una comparación del forjado de precisión y el forjado convencional con troquel impresor. Note que el forjado de precisión en este ejemplo no elimina las rebabas, aunque sí las reduce. Algunas operaciones de forjado de precisión se realizan sin producir rebaba. El forjado de precisión se clasifica propiamente como un proceso de ***forma neta*** o ***casi neta***, dependiendo de la necesidad del maquinado para acabar la forma de la pieza.



a)



b)

FIGURA 19.15 Comparación del flujo de granos metálicos en una pieza que es: *a*) forjada en caliente con acabado maquinado y *b*) completamente maquinada.

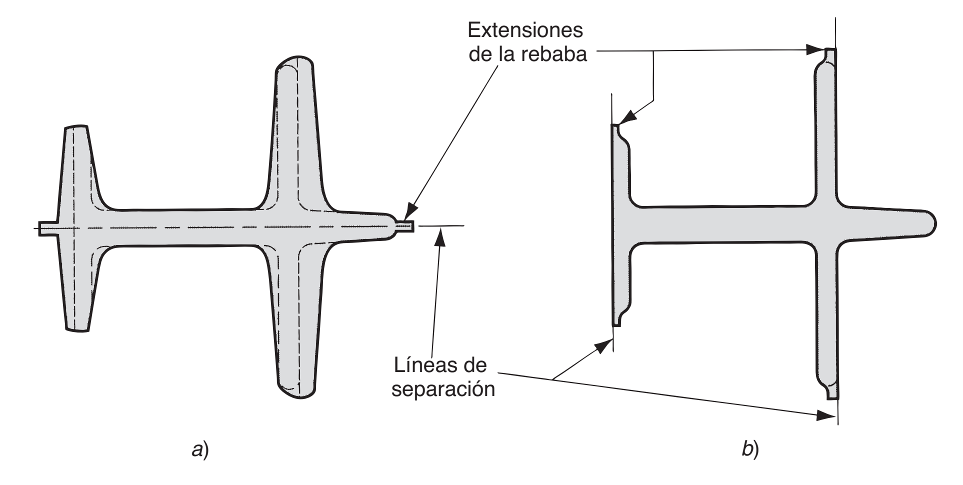


FIGURA 19.16 Secciones transversales de *a*) forjado convencional y *b*) forjado de precisión. Las líneas punteadas en *a* indican los requerimientos de maquinado posterior para convertir una pieza de forjado convencional en una forma equivalente a la de forjado de precisión. En ambos casos tiene que recortarse la rebaba.

19.3.3 Forjado sin rebaba

En la terminología industrial, el forjado con troquel impresor se llama algunas veces forjado en troquel cerrado. Sin embargo, hay una distinción técnica entre el forjado con troquel impresor y forjado con troquel cerrado real. La distinción es que en el forjado con troquel impresor, la pieza de trabajo original queda contenida completamente dentro de la cavidad del troquel durante la compresión y no se forma rebaba. La secuencia del proceso se ilustra en la figura 19.17. Para identificar este proceso es apropiado el término ***forjado sin rebaba***.

El forjado sin rebaba impone ciertos requerimientos sobre el control del proceso, más exigentes que el forjado con troquel impresor. Más importante es que el volumen de material de trabajo debe igualar al volumen de la cavidad del troquel dentro de muy estrechas tolerancias. Si la pieza en blanco inicial es demasiado grande, la presión excesiva puede causar daño al troquel o a la prensa. Si la pieza en blanco es demasiado pequeña, no se llenará la cavidad. Debido a este requerimiento especial, el proceso es más adecuado en la manufactura de piezas geométricas simples y simétricas, y para trabajar metales como el aluminio, el magnesio o sus aleaciones. El forjado sin rebaba se clasifica frecuentemente como un proceso de ***forjado de precisión*** [3].

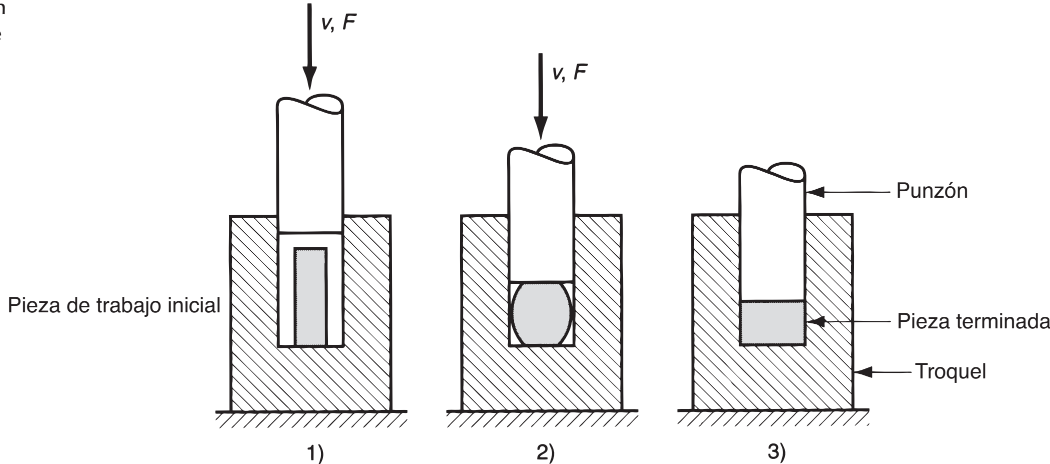


FIGURA 19.17 Forjado sin rebaba: 1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo, 2) compresión parcial y 3) final de la carrera del punzón y cierre del troquel. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento (*v* = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

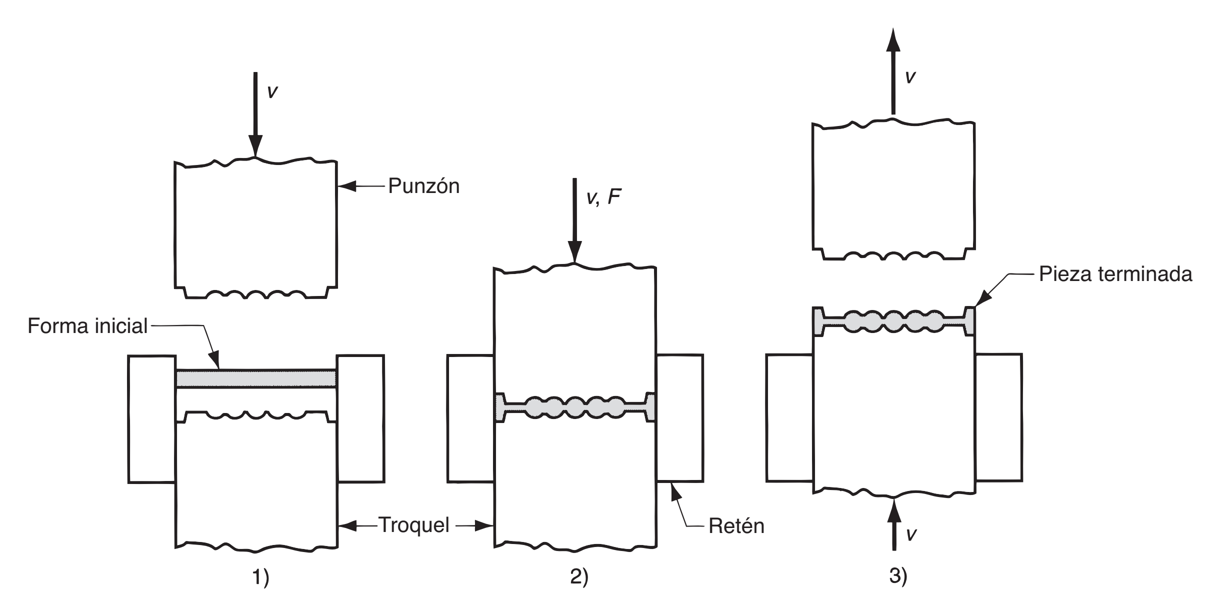


FIGURA 19.18 Operación de acuñado: 1) inicio del ciclo, 2) tiempo de compresión y 3) remoción de la pieza terminada.

Las fuerzas en el forjado sin rebaba alcanzan valores comparables a las del forjado con troquel impresor. Estas fuerzas se pueden estimar usando los mismos métodos para el forjado con troquel impresor: ecuación 19.18 y tabla 19.1.

El ***acuñado*** es una aplicación especial del forjado sin rebaba mediante el cual se imprimen los finos detalles del troquel en la superficie superior y en el fondo de la pieza de trabajo. En el acuñado hay poco flujo de metal; no obstante, las presiones requeridas para reproducir los detalles superficiales de la cavidad del troquel son altas, como se indica por el valor K_f en la tabla 19.1. Una aplicación común del acuñado es desde luego la acuñación de monedas, que se ilustra en la figura 19.18. El proceso se usa también para dar acabados superficiales y de precisión dimensional a algunas piezas fabricadas por otras operaciones.

19.3.4 Troquel de forjado, martinetes y prensas

El equipo que se usa en forjado consiste en máquinas de forja, que se clasifican en martinetes, prensas, troqueles de forjado y herramientas especiales que se usan en estas máquinas; equipos auxiliares como hornos para calentar el trabajo, dispositivos mecánicos para cargar y descargar el material de trabajo y estaciones de recorte para recortar las rebabas del forjado con troquel impresor.

Martinetes de forja Estos martinetes funcionan aplicando una descarga por impacto contra el material de trabajo. Se usa frecuentemente el término ***martinete de caída libre*** para designar estas máquinas, por la forma de liberar la energía de impacto; véanse figuras 19.19 y 19.20. Los martinetes de caída libre se usan más frecuentemente para forjado con troquel impresor. La parte superior del troquel de forjado se fija al pistón y la parte inferior se fija al yunque. En la operación, el trabajo se coloca en el troquel inferior, el pistón se eleva y luego se deja caer sobre la pieza de trabajo. Cuando la parte superior del troquel golpea el trabajo, la energía de impacto ocasiona que la pieza tome la forma de la cavidad del troquel. Se necesitan varios golpes de martillo para lograr el cambio deseado de forma. Los martinetes de caída libre se pueden clasificar como martinetes de caída libre por gravedad y de potencia. Los ***martinetes de caída libre por gravedad*** generan su energía por el peso de un pisón que cae libremente. La fuerza del golpe se determina por

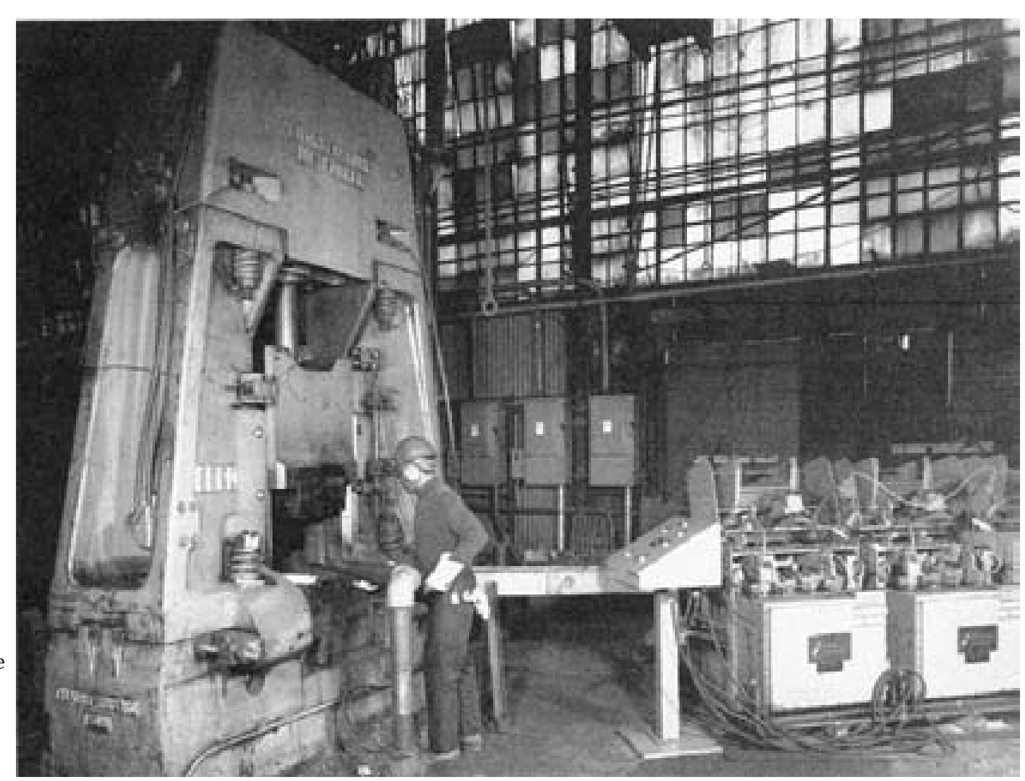


FIGURA 19.19 Martinete de forjado de caída libre alimentado por un transportador y unidades de calentamiento a la derecha de la foto (foto cortesía de Chambersburg Engineering Company).

la altura de la caída y el peso del pisón. Los ***martinetes de potencia*** aceleran el pisón con presión de aire o vapor. Una desventaja del martinete de caída libre es que una gran parte de la energía de impacto se transmite a través del yunque al piso del edificio.

Prensas de forjado Las prensas aplican una presión gradual, en lugar de impactos repentinos para realizar las operaciones de forja. Las prensas de forjado incluyen prensas mecánicas, prensas hidráulicas y prensas de tornillo. Las ***prensas mecánicas*** funcionan por medio de excéntricos, manivelas y juntas o articulaciones de bisagra que convierten el movimiento giratorio de un motor en movimientos de traslación del pisón. Estos mecanismos son muy similares a los que se usan en las prensas de estampado (sección 20.5.2). Las prensas mecánicas típicas alcanzan fuerzas muy altas en el fondo del recorrido de forjado. Las ***prensas hidráulicas*** usan un cilindro hidráulico para accionar el pisón. Las ***prensas de tornillo*** aplican la fuerza por medio de un tornillo que mueve al pisón vertical. Tanto

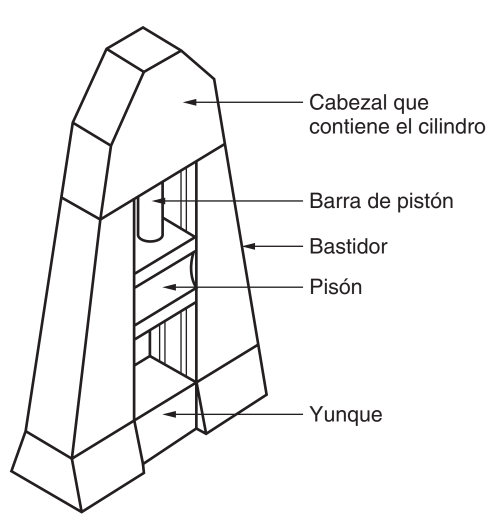


FIGURA 19.20 Detalles de un martinete de caída libre para forjado con troquel impresor.

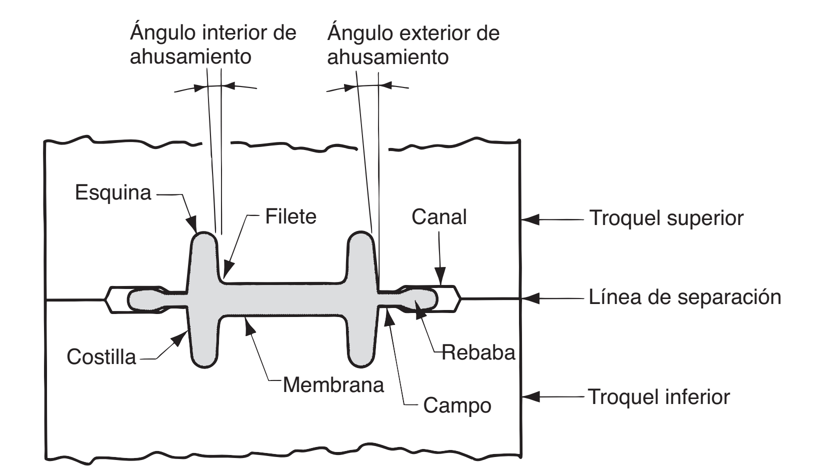


FIGURA 19.21 Terminología para un troquel convencional en forjado con troquel impresor.

las prensas de tornillo como las hidráulicas operan a velocidades bajas del pisón o ariete y pueden suministrar una fuerza constante a través de la carrera. Por tanto, estas máquinas son apropiadas para las operaciones de forjado (y otras operaciones de formado) que requieren grandes carreras.

Troqueles de forjado Es importante el diseño apropiado de los troqueles para el éxito de la operación de forjado. Las piezas que se forjan deben diseñarse con base en el conocimiento de los principios y limitaciones de este proceso. El objetivo es describir parte de la terminología y algunos lineamientos que se usan en el diseño de troqueles para forja. El diseño de los troqueles abiertos es generalmente recto, ya que su forma es relativamente simple. Estos comentarios se aplican a los troqueles impresores y a los troqueles cerrados. La figura 19.21 define parte de la terminología en un troquel de impresión.

En la revisión de la siguiente terminología de los troqueles de forjado [3] se indican algunos de los principios y limitaciones en su diseño, que deben considerarse para el diseño de las piezas o para la selección de los procesos de manufactura:

- ***Línea de separación.*** La línea de separación o partición es el plano que divide la parte superior del troquel de la parte inferior. La llamada línea de rebaba en el forjado con troquel impresor es el plano donde se encuentran las dos mitades del troquel. Su mala selección afecta el flujo de los granos de la pieza, la carga requerida y la formación de rebaba.
- ***Ahusamiento.*** Es el grado de inclinación que requiere en los lados de la pieza para poder retirarla del troquel. El término se aplica también al ahusamiento en los lados de la cavidad del molde. Los ángulos típicos de salida son de 3º para el aluminio y el magnesio, y de 5º a 7º para piezas de acero. Los ángulos de ahusamiento para forjados de precisión son cercanos a cero.
- ***Membranas y costillas.*** Una membrana es una porción delgada del forjado que es paralela a la línea de separación, mientras que una costilla es una porción delgada perpendicular a la línea de separación. Estas características de la pieza producen dificultad en el flujo de metal al adelgazarse.
- ***Filetes y radios de las esquinas.*** Los filetes y las esquinas se ilustran en la figura 19.21. Los radios pequeños tienden a limitar el flujo de metal y a incrementar la resistencia en las superficies del troquel durante el forjado.
- ***Rebaba.*** La formación de rebaba juega un papel crítico en el forjado con troqueles de impresión porque causa una acumulación de la presión dentro del troquel que promueve el llenado de la cavidad. Esta acumulación de presión se controla diseñando un campo para la rebaba y un canal dentro del troquel, como se muestra en la figura 19.21. El campo determina el área superficial a lo largo del cual ocurre el flujo lateral del metal,

controlando así el incremento de la presión dentro del troquel. El canal permite que escape material en exceso y evita que la carga de forjado se eleve a valores extremos.

19.4 OTROS PROCESOS DE DEFORMACIÓN RELACIONADOS CON EL FORJADO

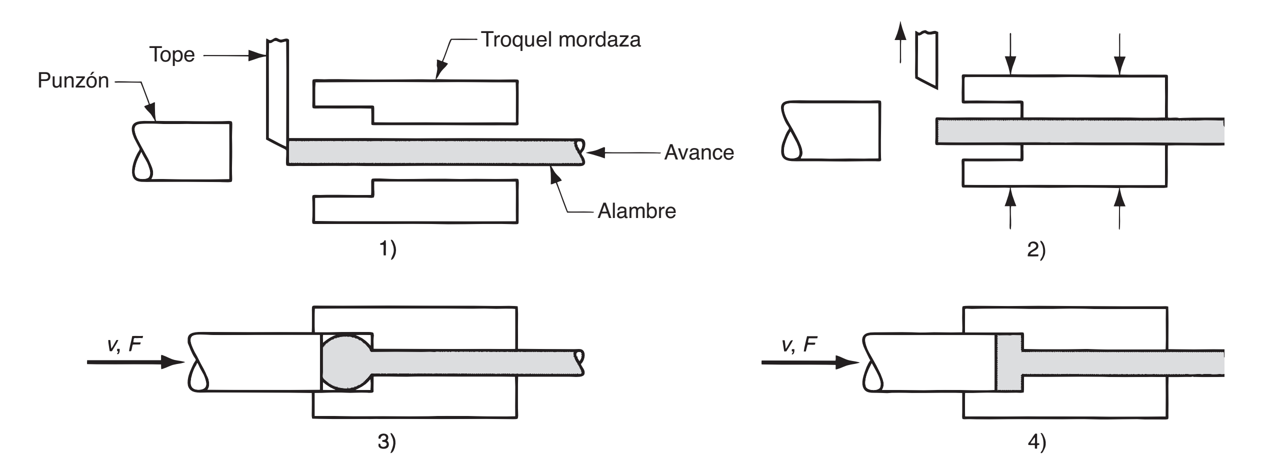
Además de las operaciones convencionales de forja descritas en las secciones anteriores, hay otras operaciones de formado de metal que se asocian muy cerca con el forjado.

Recalcado y encabezamiento El recalcado (también llamado ***forjado de recalcado***) es una operación de deformación en la cual una parte o pieza de trabajo cilíndrica aumenta su diámetro y reduce su longitud. Esta operación se analizó en nuestra descripción del forjado en troquel abierto (sección 19.3.1). Sin embargo, es una operación industrial que puede también ejecutarse como un forjado en troquel cerrado como se observa en la figura 19.22.

El recalcado se usa ampliamente en la industria de los sujetadores para formar cabezas de clavos, pernos y productos similares de ferretería. En estas aplicaciones se emplea frecuentemente el término ***encabezamiento*** para denotar la operación. La figura 19.23 ilustra una variedad de aplicaciones de encabezamiento, indicando varias configuraciones posibles del troquel. Debido a este tipo de aplicaciones, se producen más piezas por recalcado que por cualquier otra operación de forjado. El recalcado se realiza como una operación de producción en masa, en frío, en tibio o en caliente, con máquinas especiales de recalcado por forja, llamadas formadoras o cabeceadoras. En general, estas máquinas se equipan con deslizaderas horizontales, en lugar de las verticales que se usan en los martinetes y prensas convencionales. El material con que se alimentan estas máquinas son barras o alambres; se forman las cabezas con extremos de las barras y luego se corta la pieza a la longitud adecuada para hacer el artículo de ferretería deseado. Se usa el laminado de cuerdas (sección 19.2) para formar las piezas completas de pernos y tornillos.

Hay límites para la cantidad de deformación que se puede alcanzar en el recalcado, definidos usualmente como la longitud máxima del material a forjar. La longitud máxima que se puede recalcar en un golpe es tres veces el diámetro de la barra inicial. De otra manera, el metal se dobla o arruga en lugar de comprimirse para llenar adecuadamente la cavidad.

FIGURA 19.22 Una operación de recalcado para formar la cabeza de un perno u otro artículo similar. El ciclo consiste en: 1) el alambre se alimenta hasta el tope, 2) los troqueles mordaza se cierran apretando el material y el tope se retira, 3) el punzón avanza y 4) toca fondo para formar la cabeza.



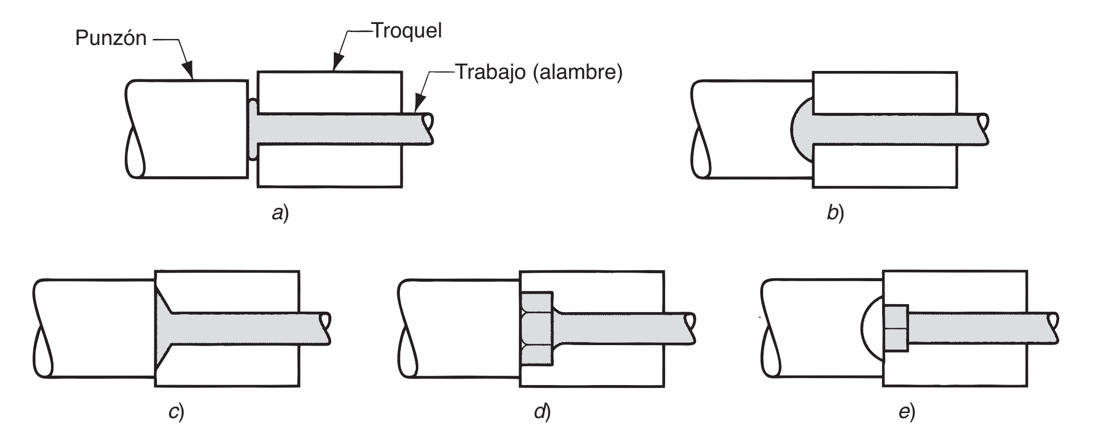
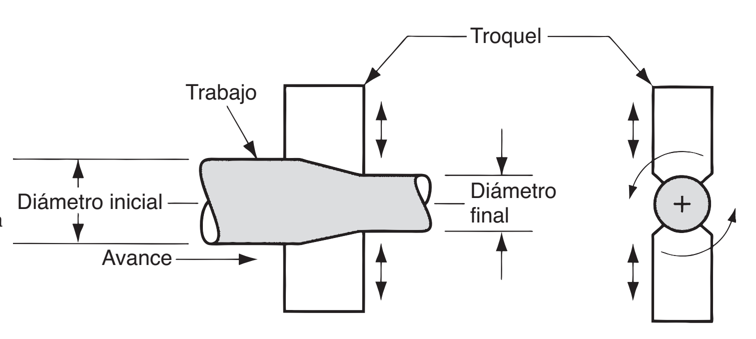


FIGURA 19.23 Ejemplos de formación de cabezas (forjado recalcado): *a*) cabeza de clavo mediante troqueles abiertos, *b*) cabeza redonda formada por el punzón, *c*) y *d*) cabezas formadas por el troquel y *e*) perno de carro formado por el troquel y el punzón.

Estampado (suajeado) con forja y forjado radial El estampado (o suajeado) y forjado radial son procesos de forjado que se usan para reducir el diámetro de un tubo o barra sólida. El estampado se ejecuta frecuentemente sobre el extremo de una pieza de trabajo para crear una sección ahusada. El proceso de ***estampado***, que se muestra en la figura 19.24, se realiza por medio de troqueles rotatorios que golpean en una pieza de trabajo radialmente hacia dentro para ahusarla conforme la pieza avanza dentro de los troqueles. La figura 19.25 ilustra algunas de las formas y productos que se hacen por estampado. Se requiere algunas veces un carrete para controlar la forma y tamaño del diámetro interno de las piezas tubulares que se estampan. El ***forjado radial*** es similar al estampado en su acción contra la pieza y se usa para crear formas similares. La diferencia es que en el forjado radial los troqueles no giran alrededor de la pieza de trabajo; en su lugar, el trabajo es el que gira al avanzar dentro de los troqueles martillo.

Forjado con rodillos El forjado con rodillos es un proceso de deformación que se usa para reducir la sección transversal de una pieza de trabajo cilíndrica (o rectangular); ésta pasa a través de una serie de rodillos opuestos con canales que igualan la forma requerida por la pieza final. La operación típica se ilustra en la figura 19.26. El forjado con rodillos se clasifica generalmente como un proceso de forja, aun cuando utiliza rodillos. Los rodillos no giran de manera continua, sino sólo a través de una porción de revolución que corresponde a la deformación que requiere la pieza. Las piezas forjadas con rodillos son generalmente más fuertes y poseen una estructura granular favorable respecto a otros procesos competidores, como el maquinado, que puede usarse para producir estas mismas piezas.

FIGURA 19.24 Proceso de estampado (suajeado) para reducir material en barra sólida; los troqueles giran al martillar el trabajo. En el forjado radial el material gira mientras los troqueles permanecen en posición fija martillando el trabajo.



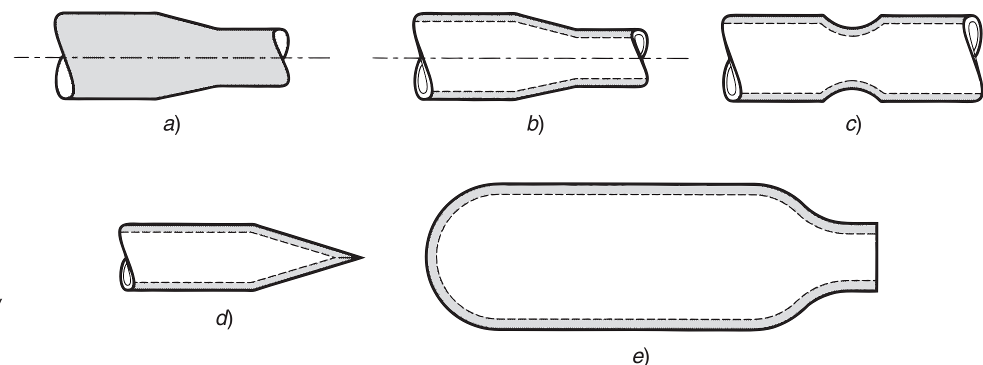
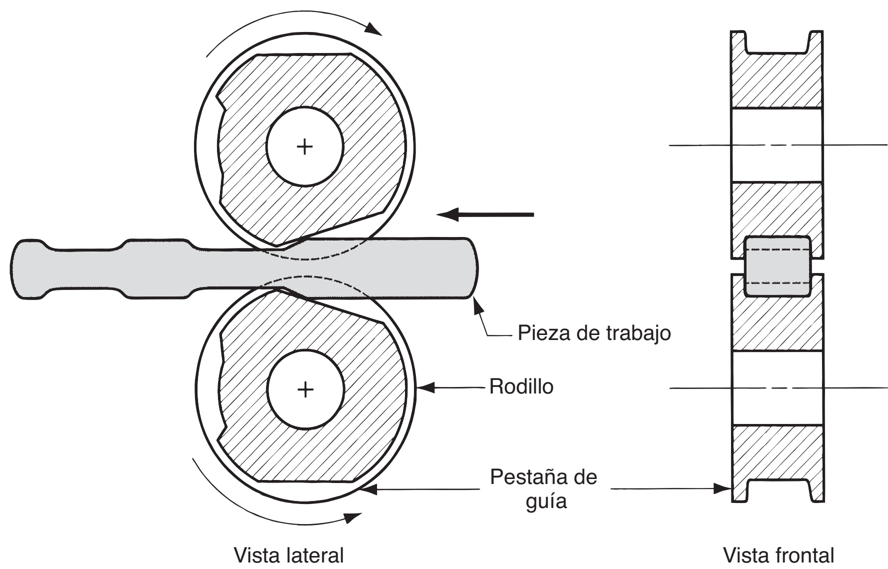


FIGURA 19.25 Ejemplos de piezas hechas por estampado: *a*) reducción de material sólido, *b*) ahusado de un tubo, *c*) estampado para formar un canal en un tubo, *d*) afilado de un tubo y *e*) estampado del cuello en un cilindro de gas.

Forjado orbital En este proceso, la deformación ocurre por medio de un troquel superior en forma de cono que presiona y gira simultáneamente sobre la pieza de trabajo. Como se ilustra en la figura 19.27, el material de trabajo se comprime sobre un troquel inferior que tiene una cavidad. Debido a que el eje del cono está inclinado, solamente una pequeña área de la superficie del trabajo se comprime en cualquier momento. Al revolver el troquel superior, el área bajo compresión también gira. Estas operaciones características del forjado orbital producen una reducción sustancial en la carga requerida de la prensa para alcanzar la deformación del trabajo.

Punzonado Como una operación de forjado, el ***punzonado*** es un proceso de deformación en el cual se prensa una forma endurecida de acero sobre un bloque de acero suave (u otro metal suave). El proceso se usa frecuentemente para hacer cavidades de moldes para moldeo de plásticos y fundición de troqueles, como se muestra en la figura 19.28. La forma de acero endurecido se llama ***punzón o fresa***, y está maquinada con la forma de la pieza que se va a moldear. Para forzar la fresa dentro del bloque de metal suave se requiere una presión sustancial; esto se logra generalmente con una prensa hidráulica. La formación completa de la cavidad de la fresa en el bloque requiere frecuentemente varios pasos, como el fresado seguido del recocido para remover el endurecimiento por deformación. Cuando el bloque de material se ha deformado en cantidades significativas, como se muestra en la figura, se elimina el exceso por maquinado. La ventaja del punzonado

FIGURA 19.26 Forjado con rodillos.



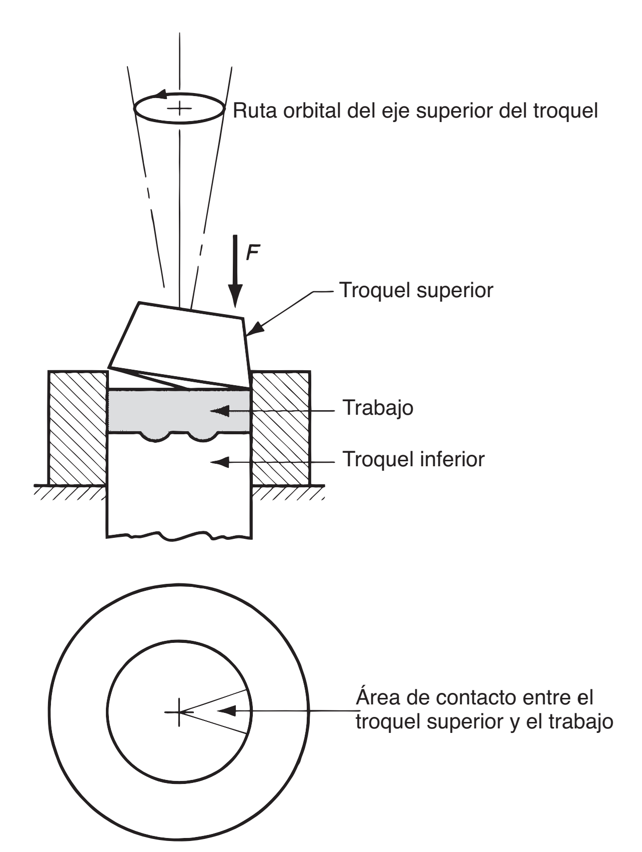
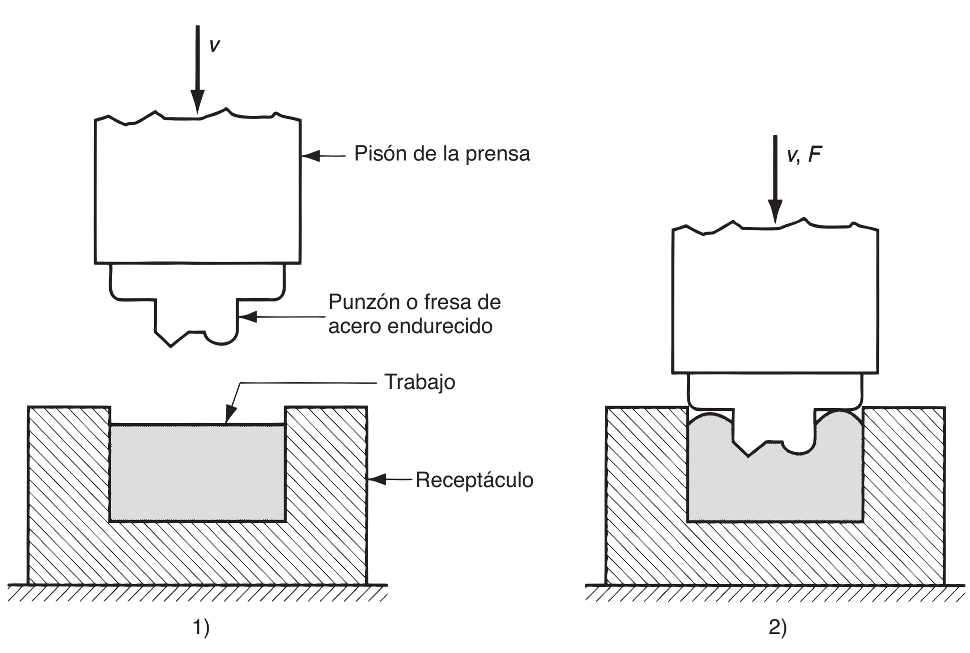


FIGURA 19.27 Forjado orbital. Al final del ciclo de deformación, el troquel inferior se eleva para expulsar la pieza.

FIGURA 19.28 Punzonado: 1) antes de la deformación y 2) al completarse el proceso. Note que el material en exceso formado por la penetración de la fresa debe removerse por maquinado.



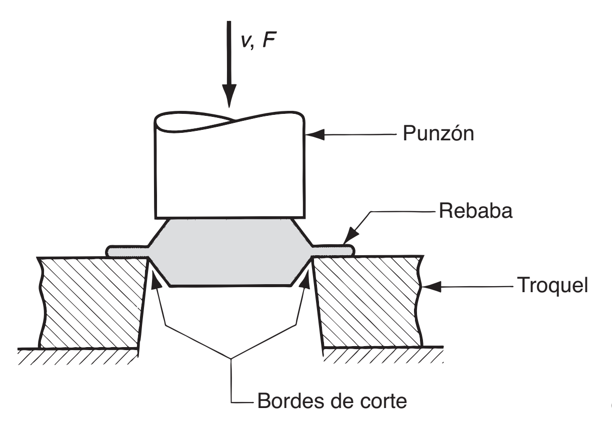


FIGURA 19.29 Operación de recorte (proceso de cizalla) para remover la rebaba después del forjado con troquel impresor.

en esta aplicación es que es más fácil maquinar la forma positiva que erosionar la cavidad negativa. Esta ventaja se multiplica en los casos donde se tienen que hacer cavidades múltiples en el bloque del troquel.

Forjado isotérmico y con troquel caliente El ***forjado isotérmico*** es un término que se aplica a operaciones de forjado caliente donde la pieza de trabajo se mantiene a temperaturas cercanas a su temperatura elevada inicial durante la deformación, usualmente mediante el calentamiento de los troqueles a esa misma temperatura elevada. Si se evita que la pieza de trabajo se enfríe al contacto con la superficie fría de los troqueles, como se hace en el forjado convencional, el metal fluye más fácilmente y la fuerza requerida para realizar el proceso se reduce. El forjado isotérmico es más costoso que el forjado convencional y se reserva para metales difíciles de forjar, como el titanio y las superaleaciones, y para piezas complejas. El proceso se lleva a cabo algunas veces al vacío para evitar la oxidación rápida del material del troquel. Similar al forjado isotérmico es el ***forjado con troquel caliente***, en el cual se calientan los troqueles a una temperatura algo menor que la del metal de trabajo.

Recortado El recortado es una operación que se usa para remover la rebaba de la pieza de trabajo en el forjado con troquel impresor. El recortado en la mayoría de los casos se realiza por cizallamiento, como en la figura 19.29, en la cual un punzón fuerza el trabajo a través de un troquel de corte, cuyo contorno tiene el perfil de la pieza deseada. El recorte se hace usualmente mientras el trabajo está aún caliente; esto significa que se debe incluir una prensa de recortado separada por cada martinete o prensa. En los casos donde el trabajo podría dañarse por el proceso de corte, el recortado puede hacerse por medios alternos, como esmerilado o aserrado.

19.5 EXTRUSIÓN

La ***extrusión*** es un proceso de formado por compresión en el cual el metal de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un troquel para darle forma a su sección transversal. El proceso puede parecerse a apretar un tubo de pasta de dientes. La extrusión data de 1800 (véase nota histórica 19.3). Las ventajas de los procesos modernos incluyen: 1) se puede extruir una gran variedad de formas, especialmente con extrusión en caliente; sin embargo, una limitación de la configuración geométrica es que la sección transversal debe ser la misma a lo largo de toda la pieza; 2) la estructura del grano y las propiedades de resistencia se mejoran con la extrusión en frío o en caliente; 3) son posibles tolerancias muy estrechas, en especial cuando se usa extrusión en frío; 4) en algunas operaciones de extrusión se genera poco o ningún material de desperdicio.

Nota histórica 19.3 *Extrusión.*

La extrusión como proceso industrial fue inventada alrededor de 1800 en Inglaterra, durante la Revolución Industrial, cuando aquel país iba a la vanguardia de las innovaciones tecnológicas. La invención consistió en la primera prensa hidráulica para extruir tubos de plomo. Un paso importante hacia delante se dio en Alemania alrededor de 1890, cuando se construyó la primera prensa horizontal de extrusión para metales con puntos de fusión más altos que los del plomo. La característica que hizo posible esto fue el uso de un bloque simulado que separaba el pisón del tocho de trabajo.

19.5.1 Tipos de extrusión

La extrusión se lleva a cabo de varias maneras. Una forma de clasificar las operaciones es atendiendo a su configuración física; se distinguen dos tipos principales: extrusión directa y extrusión indirecta. Otro criterio es la temperatura de trabajo; en frío, en tibio o en caliente. Por último, el proceso de extrusión puede ser continuo o discreto.

Extrusión directa versus extrusión indirecta La ***extrusión directa*** (también llamada ***extrusión hacia delante***) se ilustra en la figura 19.30. Un tocho de metal se carga en un recipiente, y un pisón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas en un troquel al extremo opuesto del recipiente. Al aproximarse el pisón al troquel, una pequeña porción del tocho permanece y no puede forzarse a través de la abertura del troquel. Esta porción extra, llamada ***tope o cabeza***, se separa del producto, cortándola justamente después de la salida del troquel.

Un problema en la extrusión directa es la gran fricción que existe entre la superficie del trabajo y las paredes del recipiente al forzar el deslizamiento del tocho hacia la abertura del troquel. Esta fricción ocasiona un incremento sustancial de la fuerza requerida en el pisón para la extrusión directa. En la extrusión en caliente este problema se agrava por la presencia de una capa de óxido en la superficie del tocho que puede ocasionar defectos en los productos extruidos. Para resolver este problema se usa un bloque simulado entre el pisón y el tocho de trabajo; el diámetro del bloque es ligeramente menor que el diámetro del tocho, de manera que en el recipiente queda un anillo estrecho de metal de trabajo (capas de óxido en su mayoría), dejando el producto final libre de óxidos.

En la extrusión directa se pueden hacer secciones huecas (por ejemplo, tubos) por medio del proceso que se ilustra en la figura 19.31. El tocho inicial se prepara con una perforación paralela a su eje. Esto permite el paso de un mandril que se fija en el bloque simulado. Al comprimir el tocho, se fuerza al material a fluir a través del claro entre el mandril y la abertura del troquel. La sección transversal resultante es tubular. Otras formas semihuecas se extruyen usualmente de esta misma manera.

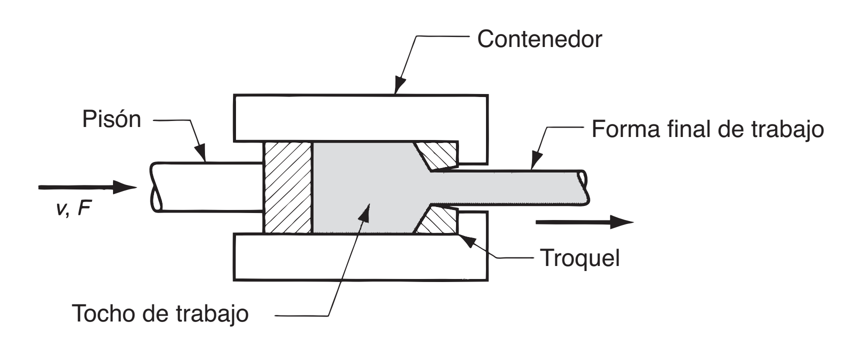


FIGURA 19.30 Extrusión directa.

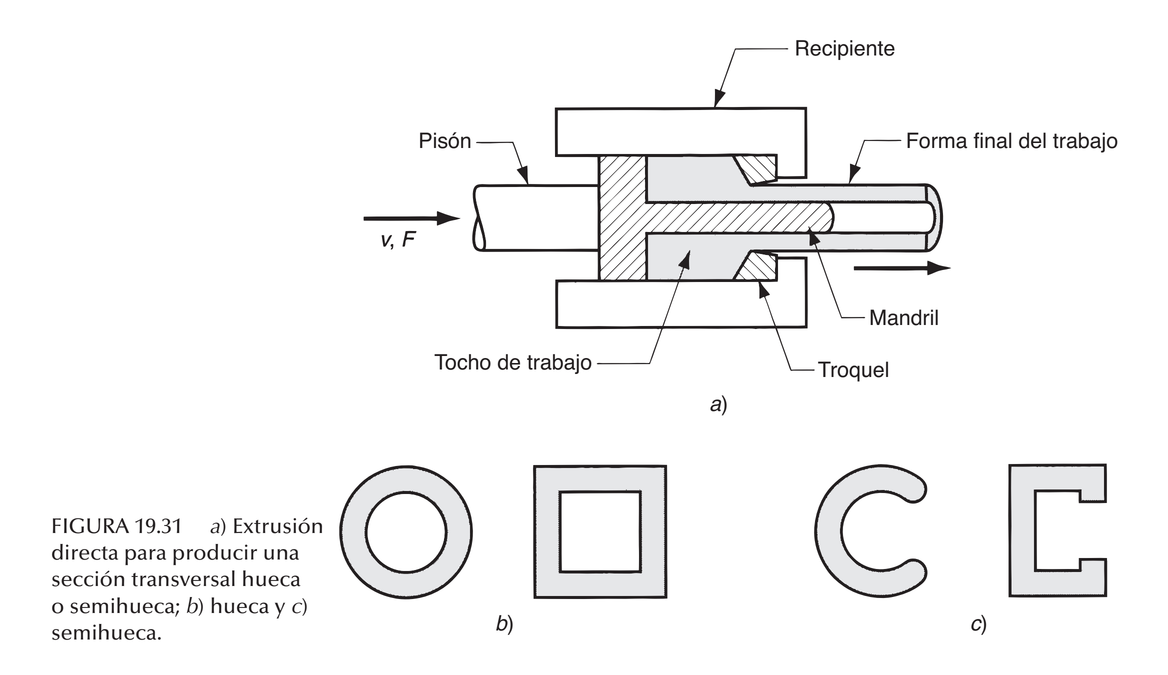


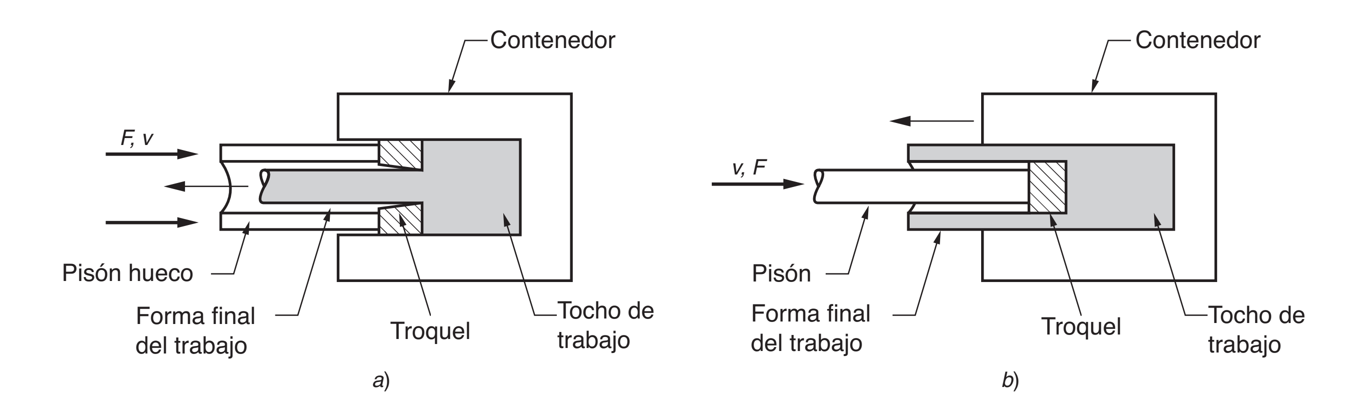
FIGURA 19.31 *a*) Extrusión directa para producir una sección transversal hueca o semihueca; *b*) hueca y *c*) semihueca.

El tocho inicial en la extrusión directa es generalmente redondo, pero la forma final queda determinada por la abertura del troquel. Obviamente, la dimensión más grande de la abertura del troquel debe ser más pequeña que el diámetro del tocho.

En la ***extrusión indirecta***, también llamada ***extrusión hacia atrás*** y ***extrusión inversa***, figura 19.32*a*), el troquel está montado sobre el pisón, en lugar de estar en el extremo opuesto del recipiente. Al penetrar el pisón en el trabajo, fuerza al metal a fluir a través del claro en una dirección opuesta a la del pisón. Como el tocho no se mueve respecto al recipiente, no hay fricción en las paredes del recipiente. Por consiguiente, la fuerza del pisón es menor que en la extrusión directa. Las limitaciones de la extrusión en directo se deben a la menor rigidez del pisón hueco y a la dificultad de sostener el producto extruido tal como sale del troquel.

La extrusión indirecta puede producir secciones (tubulares) huecas, como las de la figura 19.32*b*). En este método el pisón presiona en el tocho, forzando al material a fluir alrededor del pisón y tomar una forma de copa. Hay limitaciones prácticas en la longitud

FIGURA 19.32 Extrusión indirecta para producir *a*) una sección transversal sólida y *b*) una sección transversal hueca.



de la pieza extruida que pueden resolverse por este método. El sostenimiento del pisón se convierte en un problema a medida que la longitud de trabajo aumenta.

Extrusión en frío versus extrusión en caliente La extrusión se puede realizar ya sea en frío o en caliente, dependiendo del metal de trabajo y de la magnitud de la deformación a que se sujete el material durante el proceso. Los metales típicos que se extruyen en caliente son: aluminio, cobre, magnesio, zinc, estaño y sus aleaciones. Estos mismos materiales se extruyen algunas veces en frío. Las aleaciones de acero se extruyen usualmente en caliente, aunque los grados más suaves y más dúctiles se extruyen algunas veces en frío (por ejemplo, aceros de bajo carbono y aceros inoxidables). El aluminio es probablemente el metal ideal para extrusión (en caliente o en frío); muchos productos comerciales de aluminio se hacen por este proceso (por ejemplo, perfiles estructurales y marcos para puertas y ventanas).

La ***extrusión en caliente*** involucra el calentamiento previo del tocho a una temperatura por encima de su temperatura de cristalización. Esto reduce la resistencia y aumenta la ductilidad del metal, permitiendo mayores reducciones de tamaño y el logro de formas más complejas con este proceso. Las ventajas adicionales incluyen reducción de la fuerza del pisón, mayor velocidad del mismo, y reducción de las características del flujo de grano en el producto final. Cuando el enfriamiento del tocho entra en contacto con las paredes del recipiente es un problema; para superarlo se usa algunas veces la ***extrusión isotérmica***. La lubricación es un aspecto crítico de la extrusión en caliente de ciertos metales (por ejemplo, acero), y se han desarrollado lubricantes especiales que son efectivos bajo las condiciones agresivas de la extrusión en caliente. Algunas veces se usa el vidrio como lubricante de la extrusión en caliente; además de reducir la fricción, proporciona aislamiento térmico efectivo entre el tocho y el recipiente de extrusión.

En general, la ***extrusión en frío*** y la extrusión por debajo de su temperatura de cristalización se usan para producir piezas discretas, frecuentemente en forma terminada (o en forma casi terminada). El término ***extrusión por impacto*** se usa para indicar una extrusión fría de alta velocidad; este método se describe con más detalle en la sección 19.5.4. Algunas ventajas importantes de la extrusión en frío incluyen mayor resistencia debida al endurecimiento por deformación, tolerancias estrechas, acabados superficiales mejorados, ausencia de capas de óxidos y altas velocidades de producción. La extrusión en frío a temperatura ambiente elimina también la necesidad de calentar el tocho inicial.

Procesamiento continuo versus procesamiento discreto Un verdadero proceso continuo opera con estabilidad por un periodo indefinido de tiempo. Algunas operaciones de extrusión se aproximan a este ideal, produciendo secciones muy largas en un solo ciclo, pero estas operaciones quedan al fin limitadas por el tamaño del tocho que se puede cargar en el contenedor de extrusión. Estos procesos se describen más precisamente como operaciones semicontinuas. En casi todos los casos las secciones largas se cortan en longitudes más pequeñas en una operación posterior de corte o aserrado.

En una operación discreta de extrusión se produce una sola parte o pieza en cada ciclo de extrusión. La extrusión por impacto es un ejemplo de este caso de procesamiento discreto.

19.5.2 Análisis de la extrusión

La figura 19.33 se usará como referencia para la presente revisión de algunos parámetros de extrusión. En el diagrama se supone que tanto el tocho como la extrusión tienen una sección redonda transversal. Un parámetro importante es la ***relación de extrusión*** también llamada ***relación de reducción***. La relación se define como:

$$r_x = \frac{A_o}{A_f} \tag{19.19}$$

donde r_x = relación de extrusión; A_o = área de la sección transversal del tocho inicial, mm^2 (in^2); y A_f = área final de la sección recta de la pieza extruida, mm^2 (in^2). La relación se

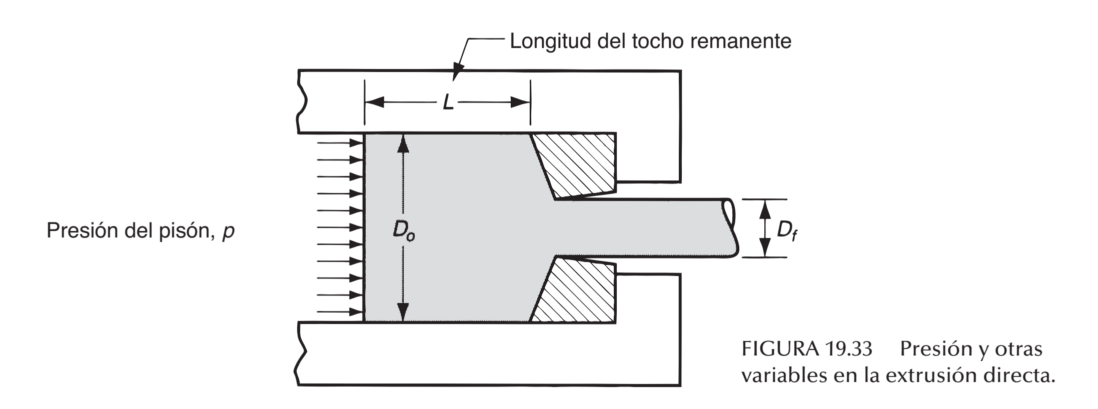


FIGURA 19.33 Presión y otras variables en la extrusión directa.

aplica tanto para la extrusión directa como para la indirecta. El valor de r_x se puede usar para determinar la deformación real de la extrusión, dado que la deformación ideal ocurre sin fricción y sin trabajo redundante:

$$\epsilon = \ln r_x = \ln \frac{A_o}{A_f} \tag{19.20}$$

La presión aplicada por el pisón para comprimir el tocho a través de la abertura del troquel se describe en la figura y se puede calcular bajo la suposición de deformación ideal (sin fricción ni trabajo redundante) como sigue:

$$p = \bar{Y}_f \ln r_x \tag{19.21}$$

donde $\bar{Y}_f$ = esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación, MPa (lb/in^2). Por conveniencia, se vuelve a expresar la ecuación 18.2 del capítulo anterior como:

$$\bar{Y}_f = \frac{K\epsilon^n}{1+n}$$

De hecho, la extrusión es un proceso sin fricción, y las ecuaciones anteriores subestiman totalmente la deformación y la presión en una operación de extrusión. La fricción existe entre el troquel y el material de trabajo, a medida que el tocho se comprime y pasa a través de la abertura del troquel. En la extrusión directa, también existe la fricción entre la pared del contenedor y la superficie del tocho. La fricción incrementa la deformación experimentada por el metal. Por tanto, la presión real es mayor que la obtenida en la ecuación 19.21, que supone una extrusión sin fricción.

Se han sugerido varios métodos para calcular la deformación real y la presión del pisón asociada en la extrusión [1], [2], [4], [10], [11] y [18]. La siguiente ecuación empírica propuesta por Johnson [10] para estimar la deformación de extrusión ha ganado considerable reconocimiento:

$$\epsilon_x = a + b \ln r_x \tag{19.22}$$

donde ϵ_x = deformación de extrusión, a y b son constantes empíricas para el ángulo del troquel. Los valores típicos de estas constantes son $a = 0.8$ y $b = 1.2$ a 1.5. Los valores de a y b tienden a aumentar cuando se incrementa el ángulo del troquel.

La presión del pisón para desempeñar la ***extrusión indirecta*** se puede estimar con base en la fórmula de Johnson para la deformación de extrusión como sigue:

$$p = \bar{Y}_f \epsilon_x \tag{19.23a}$$

donde $\bar{Y}_f$ se calcula con base en la deformación ideal de la ecuación 19.20, en lugar de la deformación de extrusión de la ecuación 19.22.

En la ***extrusión directa***, el efecto de fricción entre las paredes del recipiente y el tocho ocasiona que la presión del pisón sea más grande que para la extrusión indirecta. Se

puede escribir la siguiente expresión que aísla la fuerza de fricción en el recipiente de la extrusión directa:

$$\frac{p_f \pi D_o^2}{4} = \mu p_c \pi D_o L$$

donde p_f = presión adicional requerida para superar la fricción, MPa (lb/in^2); $\pi D_o^2/4$ = área de la sección transversal del tocho, mm^2 (in^2); μ = coeficiente de fricción en la pared del recipiente; p_c = presión del tocho contra la pared del contenedor, MPa (lb/in^2); y $\pi D_o L$ = área de la interfaz entre el tocho y la pared del recipiente, mm^2 (in^2). El miembro derecho de la ecuación indica la fuerza de fricción entre tocho-contenedor, y el lado izquierdo da la fuerza adicional del pistón para superar dicha fricción. En el peor de los casos, ocurre la adherencia en la pared del recipiente, con lo cual el esfuerzo de fricción iguala la resistencia a la fluencia cortante del metal de trabajo:

$$mp_c pD_o L = Y_s pD_o L$$

donde Y_s = resistencia a la fluencia cortante, MPa(lb/in^2). Si se supone que $Y_s = \bar{Y}_f/2$, entonces P_f se reduce a:

$$p_f = \bar{Y}_f \frac{2L}{D_o}$$

Con base en este razonamiento, se puede usar la siguiente fórmula para calcular la presión del pisón en la extrusión directa:

$$p = \bar{Y}_f \left(\epsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) \qquad (19.23b)$$

donde el término $2L/D_o$ representa la presión adicional debida a la fricción en la interfaz contenedor-tocho, L es la porción de la longitud del tocho remanente para extruirse y D_o es el diámetro original del tocho. Note que p disminuye al reducirse la longitud remanente del tocho durante el proceso. En la figura 19.34 se presentan las curvas típicas de la presión de pisón en función de la carrera del pisón para la extrusión directa e indirecta. La ecuación 19.23b probablemente sobreestima la presión del pisón. Las presiones podrían ser menores que los valores calculados por esta ecuación con una buena lubricación.

La fuerza del pisón en la extrusión directa o indirecta es simplemente la presión p de las ecuaciones 19.23a o 19.23b, respectivamente, multiplicada por el área del tocho A_o:

$$F = pA_o \qquad (19.24)$$

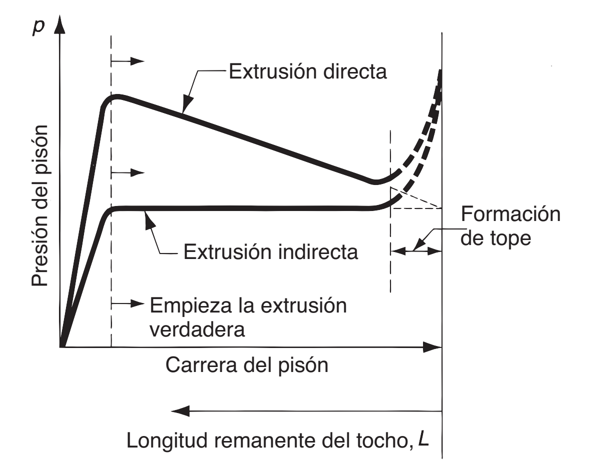


FIGURA 19.34 Gráficas típicas de la presión contra la carrera del pisón (y la longitud remanente del tocho) para extrusión directa e indirecta. Los valores más altos de la extrusión directa resultan de la fricción en las paredes del recipiente. La forma de la acumulación de la presión al inicio de la gráfica depende del ángulo del troquel (mayores ángulos del troquel significan acumulaciones de presión más pronunciadas). El incremento de presión al final de la carrera se relaciona con la formación del tope.

donde F = fuerza del pisón en extrusión, N (lb). El requerimiento de potencia para llevar a cabo la operación de extrusión es simplemente:

$$P = Fv \tag{19.25}$$

donde P = potencia, J/s(in-lb/min); F = fuerza del pisón, N (lb); v = velocidad del pisón, m/s (in/min).

EJEMPLO 19.3 Presiones de extrusión

Un tocho de 75 mm de largo y 25 mm de diámetro se extruye en una operación de extrusión directa con una relación r_x = 4.0. La extrusión tiene una sección redonda transversal. El ángulo del troquel (medio ángulo) = 90º. El metal de trabajo tiene un coeficiente de resistencia = 415 MPa, y un exponente de endurecimiento por deformación = 0.18. Use la fórmula de Johnson con a = 0.8 y b = 1.5 para estimar el esfuerzo de extrusión. Determine la presión aplicada al extremo del tocho cuando el pisón se mueve hacia delante.

Solución: Se examina la presión del pisón a las longitudes del tocho de L = 75 mm (valor inicial), L = 50 mm, L = 25 mm y L = 0. Se calcula la deformación real ideal, la deformación de extrusión usando la fórmula de Johnson y el esfuerzo de fluencia promedio:

$$\epsilon = \ln r_x = \ln 4.0 = 1.3863$$
$$\epsilon = 0.8 + 1.5(1.3863) = 2.8795$$
$$\bar{Y}_f = \frac{415(1.3863)^{0.18}}{1.18} = 373 \text{ MPa}$$

L = 75 mm: Con un ángulo del troquel de 90º, se supone que el metal del tocho será forzado a través de la abertura del troquel casi inmediatamente; entonces en el cálculo se supone que la presión máxima se alcanza a las longitudes del tocho de 75 mm. Para ángulos de troquel menores a 90º, la presión podría acumularse a un máximo, como en la figura 19.34, al comprimirse el tocho inicial dentro de la porción en forma de cono del troquel de extrusión. Usando la ecuación 19.23b:

$$p = 373\left(2.8795 + 2\frac{75}{25}\right) = 3\,312 \text{ MPa}$$
$$L = 50 \text{ mm: } p = 373\left(2.8795 + 2\frac{50}{25}\right) = 2\,566 \text{ MPa}$$
$$L = 25 \text{ mm: } p = 373\left(2.8795 + 2\frac{25}{25}\right) = 1\,820 \text{ MPa}$$

L = 0: la longitud 0 es un valor hipotético en extrusión directa. En realidad es imposible comprimir todo el metal a través de la abertura del troquel. En su lugar, una porción del tocho (el "tope") permanece sin extruir y la presión empieza a aumentar rápidamente conforme L se aproxima a cero. El incremento de presión al final de la carrera se observa en la gráfica de la presión del pisón contra la carrera del pisón en la figura 19.34. El cálculo siguiente es el valor mínimo hipotético de la presión del pisón que podría resultar cuando L = 0.

$$p = 373\left(2.8795 + 2\frac{0}{25}\right) = 1\,074 \text{ MPa}$$

Éste es también el valor de la presión del pistón que estaría asociado con la extrusión indirecta a lo largo de toda la longitud del tocho. ■

19.5.3 Troqueles y prensas de extrusión

Los factores importantes en un troquel de extrusión son el ángulo del troquel y la forma del orificio. El ángulo del troquel, más precisamente la mitad del ángulo del troquel, es el

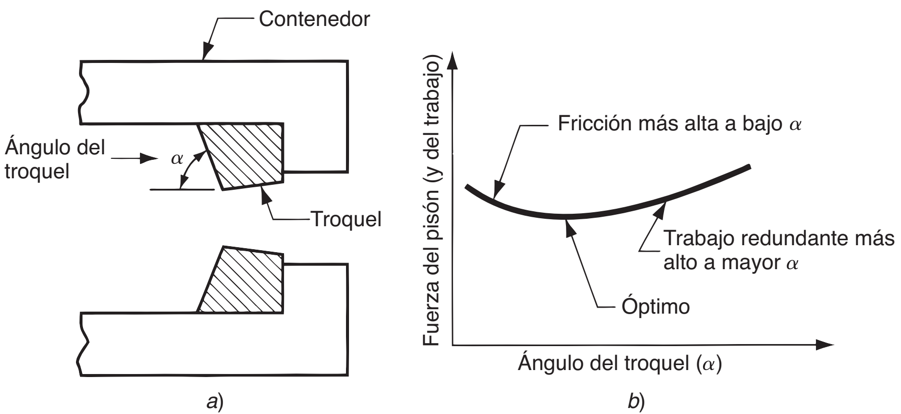


FIGURA 19.35 *a*) Definición del ángulo del troquel en extrusión directa, *b*) efecto del ángulo del troquel sobre la fuerza del pisón.

ángulo α, de la figura 19.35*a*). Para ángulos menores, el área superficial del troquel aumenta, así como también la fricción en la interfaz troquel-tocho. Mayor fricción significa mayor fuerza en el pisón. Por otra parte, un ángulo grande del troquel ocasiona mayor turbulencia del flujo de metal durante la reducción, y también incremento en la fuerza requerida del pisón. El efecto del ángulo del troquel sobre la fuerza del pisón es una función en forma de U como se muestra en la figura 19.35*b*). Existe un ángulo óptimo del troquel, como lo sugiere la gráfica hipotética. Este ángulo depende de varios factores, como material de trabajo, temperatura del tocho y lubricación; en consecuencia, es difícil determinarlo para un trabajo de extrusión. Los diseñadores de troquel usan reglas empíricas para decidir el ángulo apropiado.

Las ecuaciones previas para la presión del pisón, ecuaciones 19.23a, se aplican a los orificios circulares del troquel. La forma del orificio del troquel afecta la presión requerida del pisón en una operación de extrusión. Una sección transversal compleja, figura 19.36, requiere más presión y fuerza que una sección circular. El efecto de la forma del orificio del troquel puede valorarse por el ***factor de forma***, definido como la relación entre la presión requerida para extruir una sección transversal de la forma dada y la presión de extrusión para una sección redonda de la misma área. Se puede expresar el factor de forma como sigue:

$$K_x = 0.98 + 0.02\left(\frac{C_x}{C_x}\right)^{2.25} \tag{19.26}$$

donde K_x = factor de forma del troquel en extrusión; C_x = perímetro de la sección transversal extruida mm (in); y C_c = perímetro de un círculo de la misma área que la forma extruida, mm (in). La ecuación 19.26 se basa en los datos empíricos de la referencia [1] en una escala de valores de C_x/C_c desde 1.0 hasta cerca de 6.0. La ecuación puede no ser válida para valores mayores al límite superior de esta escala.

Como se indica en la ecuación 19.26, el factor de forma es una función del perímetro de la sección transversal del material extruido, dividida entre el perímetro de una sección circular de área igual. Una forma circular es la forma más simple con un valor de K_x = 1.0. Las secciones huecas de superficies delgadas tienen factores de forma más altos y difíciles de extruir. El aumento de la presión no se incluye en las ecuaciones previas para la presión, ecuaciones 19.23*a*, las cuales se aplican solamente para secciones transversales redondas. Para formas distintas a la redonda, la expresión correspondiente para una extrusión indirecta es:

$$p = K_x \bar{Y}_f \epsilon_x \tag{19.27a}$$

y para extrusión directa:

$$p = K_x \bar{Y}_f \left(\epsilon_x + \frac{2L}{D_o}\right) \tag{19.27b}$$

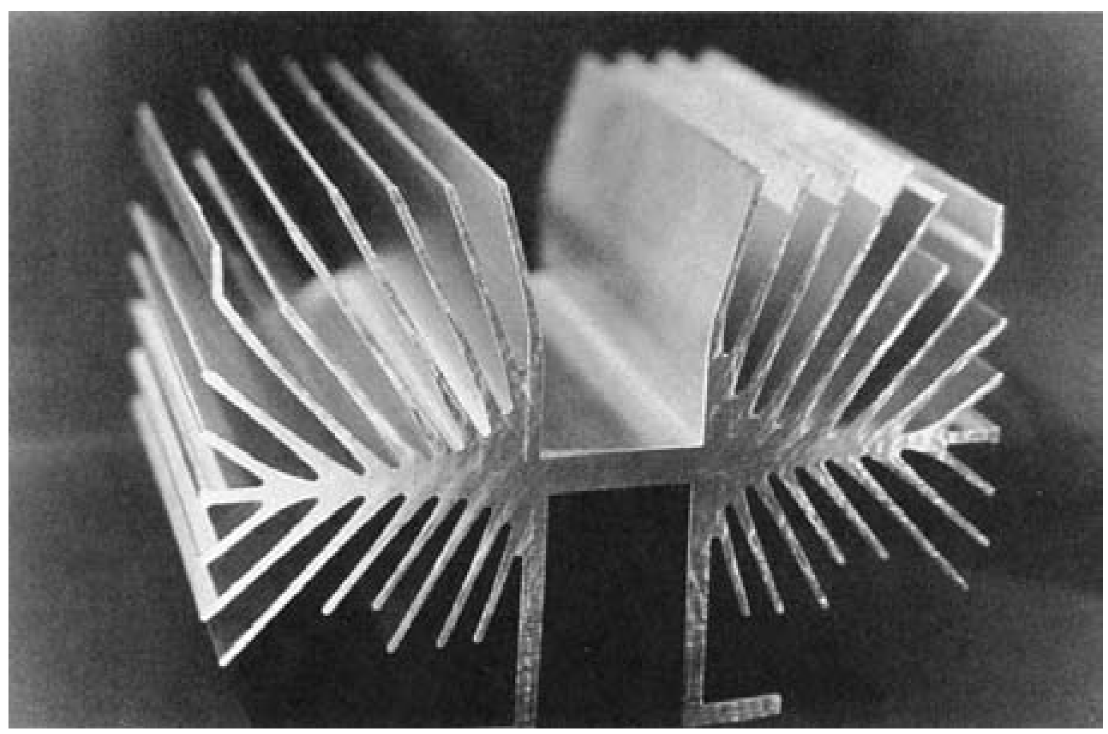


FIGURA 19.36 Una extrusión de sección transversal compleja para un disipador de calor (foto cortesía de Aluminum Company of America).

donde p = presión de extrusión, MPa (lb/in^2); K_x = factor de forma; los otros términos tienen el mismo significado de antes. Los valores de la presión obtenidos por estas ecuaciones pueden usarse en la ecuación 19.24 para determinar la fuerza del pisón.

Los materiales para troqueles de extrusión en caliente incluyen aceros para herramienta y aceros aleados. Las propiedades más importantes de estos materiales para troqueles son alta resistencia al desgaste, alta dureza en caliente y alta conductividad térmica para remover el calor del proceso. Los materiales para troqueles de extrusión en frío incluyen aceros para herramienta y carburos cementados. Sus propiedades deseables son resistencia al desgaste y buena disposición para retener su forma bajo altos esfuerzos. Los carburos se usan cuando se requieren altas velocidades de producción, larga vida en los troqueles y buen control dimensional.

Las prensas de extrusión pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de la orientación de los ejes de trabajo. Los tipos horizontales son los más comunes. Las prensas de extrusión son accionadas normalmente por fuerza hidráulica, la cual es especialmente apropiada para producción semicontinua de secciones largas, como en la extrusión directa. Frecuentemente se usa la impulsión mecánica para extrusión en frío de piezas individuales, tales como la extrusión por impacto.

19.5.4 Otros procesos de extrusión

Los métodos principales de extrusión son la extrusión directa e indirecta. Hay varios nombres que se dan a algunas operaciones especiales de extrusión directa o indirecta cuyos métodos se describen aquí. Otras operaciones de extrusión son únicas. En esta sección se examinan estas formas especiales de extrusión y los procesos relacionados.

Extrusión por impacto La extrusión por impacto se realiza a altas velocidades y carreras más cortas que la extrusión convencional. Se usa para hacer componentes individuales.

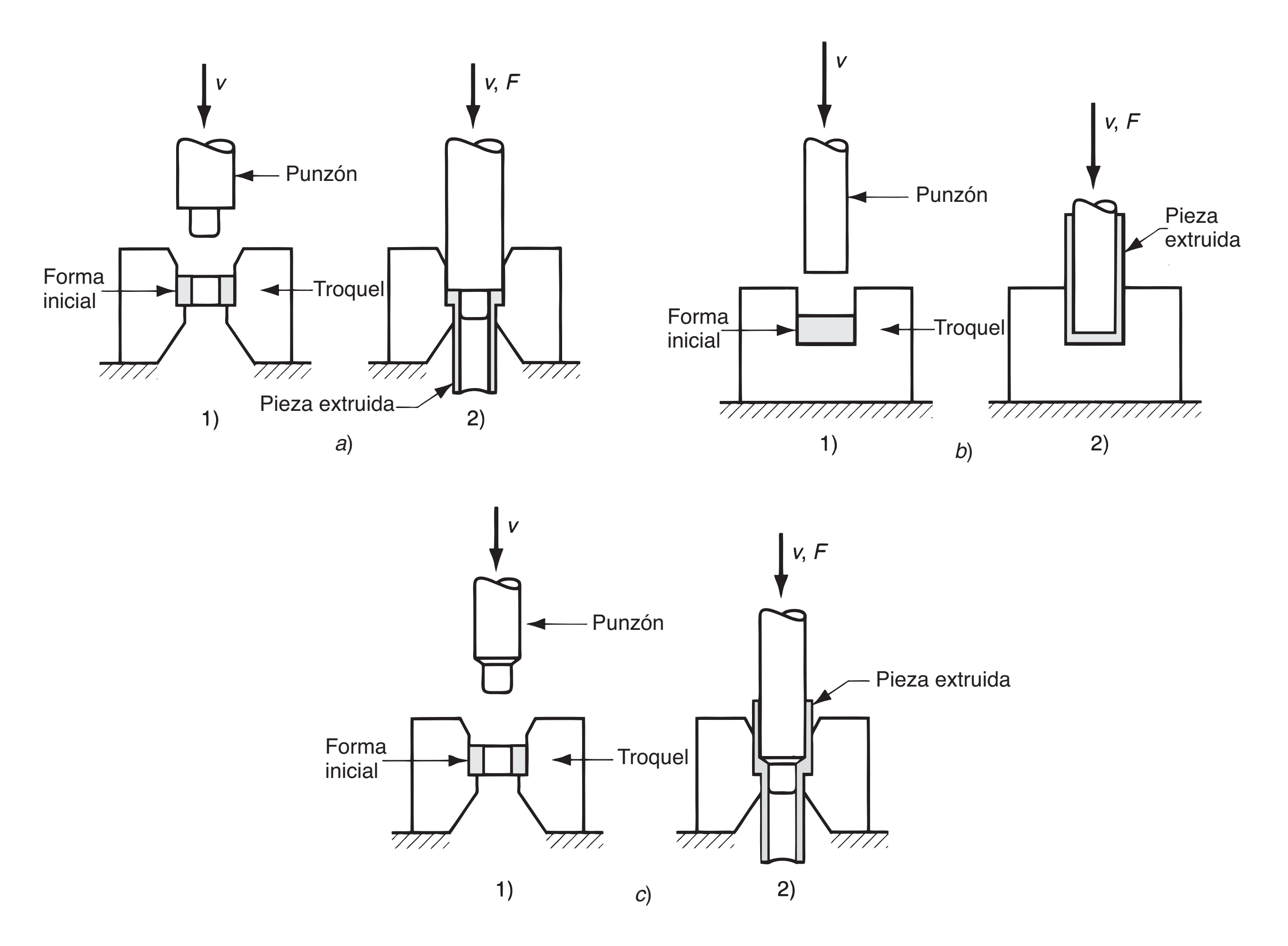


FIGURA 19.37 Varios ejemplos de extrusión por impacto: *a*) hacia delante, *b*) hacia atrás y *c*) combinación de las dos.

Como su nombre lo indica, el punzón golpea a la pieza de trabajo más que aplicar presión. La extrusión por impacto se puede llevar a cabo como extrusión hacia delante, extrusión hacia atrás o una combinación de ambas. Algunos ejemplos representativos se muestran en la figura 19.37.

La extrusión por impacto se hace usualmente en frío con varios metales; la extrusión por impacto hacia atrás es la más común. Los productos hechos por este proceso incluyen tubos para pastas de dientes y contenedores de baterías. Estos ejemplos muestran que se pueden hacer paredes muy delgadas en las piezas extruidas por impacto. Las características de alta velocidad del proceso por impacto permiten grandes reducciones y altas velocidades de producción, de aquí su alta importancia comercial.

Extrusión hidrostática Un problema de la extrusión directa es la fricción a lo largo de la interfaz tocho-contenedor. Este problema se puede solucionar al poner en contacto el tocho en el fluido en el interior del recipiente, presionando el fluido por el movimiento hacia delante del pisón, como se muestra en la figura 19.38, de tal manera que no exista fricción dentro del recipiente y se reduzca también la fricción en la abertura del troquel. La fuerza del pisón es entonces bastante menor que en la extrusión directa. La presión del fluido que actúa sobre todas las superficies del tocho da su nombre al proceso. Se puede llevar a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas. Para temperaturas elevadas se necesitan fluidos y procedimientos especiales. La extrusión hidrostática es una adaptación de la extrusión directa.

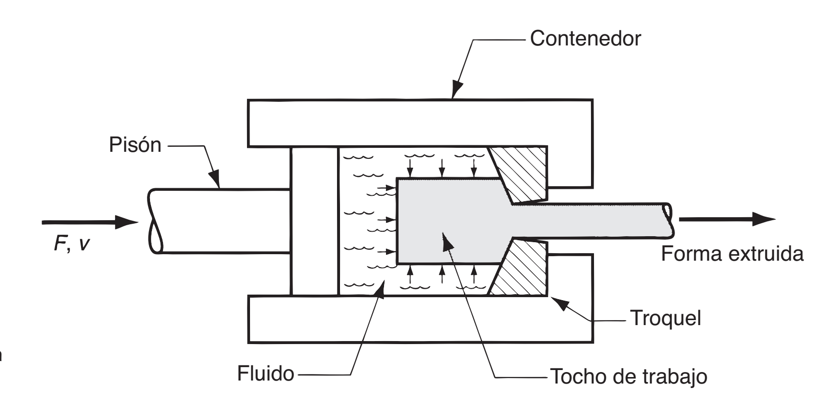


FIGURA 19.38 Extrusión hidrostática.

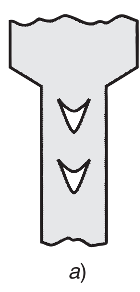
La presión hidrostática sobre el material de trabajo incrementa la ductilidad del material. Por consiguiente, este proceso se puede usar con metales que son demasiado frágiles para operaciones de extrusión convencional. Los metales dúctiles también pueden extruirse hidrostáticamente, y es posible una alta relación de reducción en esos materiales. Una desventaja del proceso es que se requiere preparar los tochos iniciales de trabajo. El tocho debe formarse con un huso en uno de sus extremos para ajustarlo al ángulo de entrada del troquel. Éste actúa como un sello que previene fugas del fluido a través de la abertura del troquel, al iniciar la presurización del recipiente.

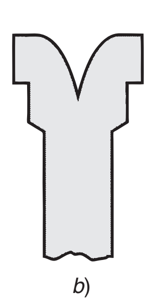
19.5.5 Defectos en productos extruidos

Debido a la considerable deformación asociada a las operaciones de extrusión, pueden ocurrir numerosos defectos en los productos extruidos. Los defectos se pueden clasificar en las siguientes categorías que se ilustran en la figura 19.39:

a) ***Reventado central***. Este defecto es una grieta interna que se genera como resultado de los esfuerzos de tensión a lo largo de la línea central de la pieza de trabajo durante la extrusión. Aunque los esfuerzos de tensión pueden parecer improbables en un proceso de compresión como la extrusión, tienden a ocurrir bajo condiciones que ocasionan gran deformación en regiones de trabajo apartadas del eje central. El movimiento de material más grande en las regiones exteriores estira el material a lo largo del centro de la pieza de trabajo. Si los esfuerzos son lo suficientemente grandes, ocurre el reventado central. Las condiciones que promueven estas fallas son los ángulos altos del troquel, las bajas relaciones de extrusión y las impurezas del metal de trabajo que sirven como puntos de inicio para las grietas. Lo difícil del reventado central es su detección. Es un defecto interno que no se observa generalmente por inspección visual. Otros nombres que se usan para este defecto son ***fractura de punta de flecha, agrietado central y agrietado tipo chevron.***

b) ***Tubificado (bolsa de contracción)*** La tubificación es un defecto asociado con la extrusión directa. Como se puede apreciar en la figura 19.39*b*), es un hundimiento en el extremo del tocho. El uso de un bloque simulado, cuyo diámetro sea ligeramente





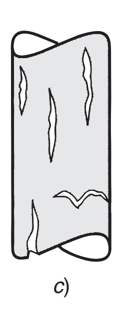


FIGURA 19.39 Algunos defectos comunes en extrusión: *a*) reventado central, *b*) tubificación (bolsa de contracción) y *c*) agrietado superficial.

menor que el del tocho, ayuda a evitar la tubificación. Otros nombres que se dan a este defecto son ***cola de tubo y cola de pescado***.

c) ***Agrietado superficial*** Este defecto es resultado de las altas temperaturas de la pieza de trabajo que causan el desarrollo de grietas en la superficie; ocurre frecuentemente cuando la velocidad de extrusión es demasiado alta y conduce a altas velocidades de deformación asociadas con generación de calor. Otros factores que contribuyen al agrietamiento superficial son la alta fricción y el enfriamiento rápido de la superficie de los tochos a altas temperaturas en la extrusión en caliente.

19.6 ESTIRADO DE ALAMBRES Y BARRAS

En el contexto de los procesos de deformación volumétrica, el ***estirado*** es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce al tirar del material a través de la abertura de un troquel como se muestra en la figura 19.40. Las características generales del proceso son similares a las de la extrusión; la diferencia es que en el estirado el material de trabajo se jala a través del troquel, mientras que en la extrusión se empuja a través de él. Aunque la presencia de esfuerzos de tensión es obvia en el estirado, la compresión también juega un papel importante, ya que el metal se comprime al pasar a través de la abertura del troquel. Por esta razón, la deformación que ocurre en el estirado se llama algunas veces compresión indirecta. El estirado es un término que se usa también en el trabajo de láminas metálicas (sección 20.3). El término ***estirado de alambre y barras*** se usa para distinguir los procesos de estirado de los procesos de trabajo de láminas del mismo nombre.

La diferencia básica entre el estirado de barras y el estirado de alambre es el tamaño del material que se procesa. El ***estirado de barras*** se refiere al material de barras y varillas de diámetro grande, mientras que el ***estirado de alambre*** se aplica al material de diámetro pequeño. En el proceso de estirado de alambres se puede alcanzar diámetros hasta de 0.03 mm (0.001 in). Aunque la mecánica del proceso es la misma para los dos casos, el equipo y la terminología son de alguna manera diferentes.

El estirado de barras se realiza generalmente como una operación de ***estirado simple***, en la cual el material se jala a través de la abertura del troquel. Debido a que el material inicial tiene un diámetro grande, su forma es más bien una pieza recta que enrollada. Esto limita la longitud del trabajo que puede procesarse y es necesaria una operación tipo lote. Por el contrario, el alambre se estira a partir de rollos de alambre que miden varios cientos (o miles) de ft de longitud y pasa a través de una serie de troqueles de estirado. El número de troqueles varía entre cuatro y doce. El término ***estirado continuo*** se usa para describir este tipo de operación, debido a las grandes corridas de producción que pueden alcanzarse con los rollos de alambre, ya que pueden soldarse a tope con el siguiente rollo para hacer la operación verdaderamente continua.

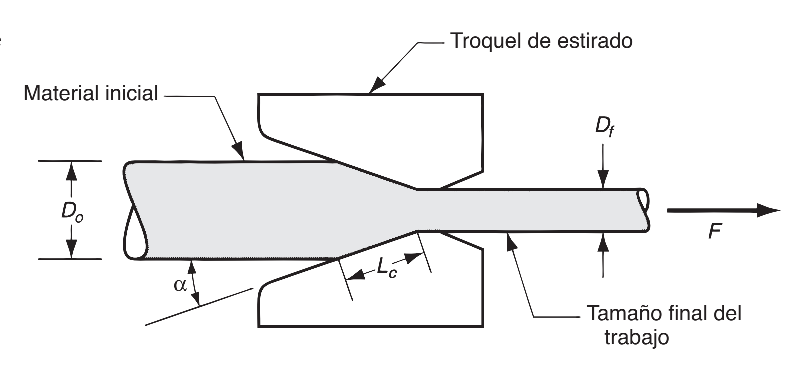


FIGURA 19.40 Estirado de barras, varillas o alambre.

En una operación de estirado, la modificación en el tamaño del trabajo se da generalmente por la reducción del área definida como sigue:

$$r = \frac{A_o - A_f}{A_o} \tag{19.28}$$

donde r = reducción del área en el estirado; A_o = área original del trabajo, mm^2 (in^2); y A_f = área final, mm^2 (in^2). La reducción del área se expresa frecuentemente como un porcentaje.

En el estirado de barras, estirado de varillas y en el estirado de alambre de diámetro grande para operaciones de recalcado y forjado de cabezas se usa el término draft para denotar la diferencia de tamaños antes y después de procesar el trabajo. El ***draft*** es simplemente la diferencia entre los diámetros original y final del material:

$$d = D_o - D_f \tag{19.29}$$

donde d = draft, mm (in); D_o = diámetro original del trabajo, mm (in); D_f = diámetro final del trabajo, mm (in).

19.6.1 Análisis del estirado

En esta sección se revisará la mecánica del estirado de alambre y barras, y el cálculo de esfuerzos y fuerzas en el proceso. Se considerará también la posibilidad de grandes reducciones en las operaciones de estirado.

Mecánica del estirado Si no ocurre fricción o trabajo redundante en el estirado, la deformación real puede determinarse como sigue:

$$\epsilon = \ln\frac{A_o}{A_f} = \ln\frac{1}{1-r} \tag{19.30}$$

donde A_o y A_f son las áreas original y final de la sección transversal del material de trabajo, como se definieron previamente; y r = reducción del estirado, definida en la ecuación 19.28. El esfuerzo que resulta de esta deformación ideal está dado por:

$$\sigma = \bar{Y}_f \epsilon = \bar{Y}_f \ln\frac{A_o}{A_f} \tag{19.31}$$

donde $\bar{Y}_f = \dfrac{K\epsilon^n}{1+n}$ = esfuerzo de fluencia promedio, basado en el valor de la deformación de la ecuación 19.30.

Debido a que la fricción está presente en el estirado y aunque el metal de trabajo experimenta deformación no homogénea, el verdadero esfuerzo es más grande que el proporcionado por la ecuación 19.31. Además de la relación A_o/A_f, otras variables que tienen influencia en el esfuerzo del estirado son el ángulo del troquel y el coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel. Se han propuesto numerosos métodos para predecir el esfuerzo de estirado con base en los valores de estos parámetros [1], [2], [12] y [18]. A continuación se presenta la ecuación sugerida por Schey [18]:

$$\sigma_d = \bar{Y}_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan\alpha}\right)\phi \ln\frac{A_o}{A_f} \tag{19.32}$$

donde σ_d = esfuerzo de estirado, MPa (lb/in^2); μ = coeficiente de fricción troquel-trabajo; α = ángulo del troquel (medio ángulo) como se define en la figura 19.40; y ϕ es un factor que se usa para deformación no homogénea, el cual se determina para una sección transversal redonda como:

$$\phi = 0.88 + 0.12\frac{D}{L_c} \tag{19.33}$$

donde D = diámetro promedio del trabajo durante el estirado, mm (in); y L_c = longitud de contacto del trabajo con el troquel de estirado en la figura 19.40, mm (in). Los valores

de D y L_c se pueden determinar con las siguientes ecuaciones:

$$D = \frac{D_o + D_f}{2} \tag{19.34a}$$

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2 \text{ sen } \alpha} \tag{19.34b}$$

La fuerza correspondiente de estirado es entonces el área de la sección transversal del material estirado multiplicada por el esfuerzo de estirado:

$$F = A_f \sigma_d = A_f \bar{Y}_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha}\right) \phi \ln \frac{A_o}{A_f} \tag{19.35}$$

donde F = fuerza de estirado, N(lb); los otros términos se definieron previamente. La potencia requerida en una operación de estirado es la fuerza multiplicada por la velocidad de salida del trabajo.

EJEMPLO 19.4
Esfuerzo y fuerzas en el estirado del alambre

Un alambre se estira a través de un troquel de estirado con un ángulo de entrada = 15º. El diámetro inicial es de 2.5 mm y el diámetro final es de 2.0 mm. El coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel = 0.07. El metal tiene un coeficiente de resistencia K = 205 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación n = 0.20. Determine el esfuerzo de estirado y la fuerza de estirado en esta operación.

Solución: Los valores de D y L_c para la ecuación 19.33 se pueden determinar usando la ecuación 19.34. D = 2.25 mm y L_c = 1.0 mm. Por lo tanto:

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{2.25}{1.0} = 1.15$$

Se calculan las áreas respectivas antes y después del estirado y se obtienen los valores A_o = 4.91 mm^2 y A_f = 3.14 mm^2. La deformación real resultante ϵ = ln(4.91/3.14) = 0.446, y el esfuerzo de fluencia promedio en la operación se calcula como:

$$\bar{Y}_f = \frac{205(0.446)^{0.20}}{1.20} = 145.4 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de estirado está dado por la ecuación 19.32:

$$\sigma_d = (145.4)\left(1 + \frac{0.07}{\tan 15}\right)(1.15)(0.446) = 94.1 \text{ MPa}$$

Por último, la fuerza de estirado es el esfuerzo multiplicado por el área de la sección transversal del alambre de salida:

$$F = 94.1(3.14) = 295.5 \text{ N}$$

■

Reducción máxima por pase Una pregunta que se le puede ocurrir al lector es: ¿por qué se necesita más de un paso para alcanzar la reducción deseada en el estirado del alambre?, ¿por qué no se hace la reducción entera en un solo paso a través de un solo troquel como se hace en la extrusión? La respuesta es que resulta claro, de las ecuaciones precedentes, que si la reducción se incrementa, también los esfuerzos de estirado aumentan. Si la reducción es lo suficientemente grande, los esfuerzos de estirado excederían la resistencia a la fluencia del material que sale. Cuando esto pasa, el alambre estirado simplemente se alarga, en lugar de que el nuevo material se comprima a través de la abertura del troquel. Para que el estirado del alambre sea exitoso, el esfuerzo máximo de estirado debe ser menor que el esfuerzo de fluencia del material que sale.

Es fácil determinar este esfuerzo de estirado máximo y la posible reducción máxima que puede hacerse en un paso bajo ciertas suposiciones. Suponga un metal perfectamente

plástico ($n = 0$), sin fricción y sin trabajo redundante. En este caso ideal, el esfuerzo de estirado máximo posible es igual a la resistencia a la fluencia del material de trabajo. Si se expresa esto usando la ecuación para el esfuerzo de estirado bajo condiciones de deformación ideal, ecuación 19.31, y se iguala $\overline{Y}_f = Y$ (porque $n = 0$):

$$\sigma_d = \overline{Y}_f \ln\frac{A_o}{A_f} = Y\ln\frac{A_o}{A_f} = Y\ln\frac{1}{1-r} = Y$$

Esto significa que $(A_o/A_f) = \ln(1/(1 - r)) = 1$. De aquí que, $(A_o/A_f) = 1/(1 - r)$ deben ser igual a los logaritmos naturales base e. es decir, la deformación máxima posible es 1.0:

$$\epsilon_{máx} = 1.0 \qquad (19.36)$$

La relación máxima posible de área está dada por:

$$\frac{A_o}{A_f} = e = 2.7183 \qquad (19.37)$$

y la reducción máxima posible es:

$$r_{máx} = \frac{e-1}{e} = 0.632 \qquad (19.38)$$

El valor dado para la ecuación 19.38 se usa frecuentemente como la reducción teórica máxima posible en un solo paso, aun cuando ésta ignora: 1) los efectos de fricción y del trabajo redundante que podrían reducir el valor máximo posible, 2) el endurecimiento por deformación, que podría incrementar la reducción máxima posible debido a que el alambre a la salida podría ser más resistente que el metal inicial. En la práctica, las reducciones de estirado por paso están muy por debajo de los límites teóricos. Los límites superiores en la práctica industrial parecen ser reducciones de 0.50 para estirado simple de barras y 0.30 para estirado múltiple de alambre.

19.6.2 Práctica del estirado

El estirado se realiza generalmente como una operación de trabajo en frío. Se usa más frecuentemente para producir secciones redondas, pero también se pueden estirar secciones cuadradas y de otras formas. El estirado de alambre es un proceso industrial importante que provee productos comerciales como cables y alambres eléctricos; alambre para cercas, ganchos de ropa y carros para supermercados; varillas para producir clavos, tornillos, remaches, resortes y otros artículos de ferretería. El estirado de barras se usa para producir barras de metal para maquinado forjado y para otros procesos.

Las ventajas del estirado en estas aplicaciones incluyen: 1) estrecho control dimensional, 2) buen acabado de la superficie, 3) propiedades mecánicas mejoradas, como resistencia y dureza, 4) adaptabilidad para producción económica en masa o en lotes. Las velocidades de estirado son tan altas como 50 m/s (10 000 ft/min) para alambre muy fino. En el caso del estirado de barras se produce material para maquinado; la operación mejora la maquinabilidad de las barras (sección 24.1).

Equipo de estirado El estirado de barras se realiza en una máquina llamada ***banco de estirado*** que consiste en una mesa de entrada, un bastidor del troquel (que contiene el troquel de estirado), la corredera y el armazón de salida. El arreglo se muestra en la figura 19.41. La corredera se usa para jalar el material a través del troquel de estirado. Está accionado por cilindros hidráulicos o cadenas movidas por un motor. El bastidor del troquel se diseña frecuentemente para contener más de un troquel, de manera que se puedan estirar varias barras simultáneamente a través de los respectivos troqueles.

El estirado de alambre se hace con máquinas estiradoras continuas que contienen múltiples troqueles de estirado separados por tambores de acumulación entre los troqueles,

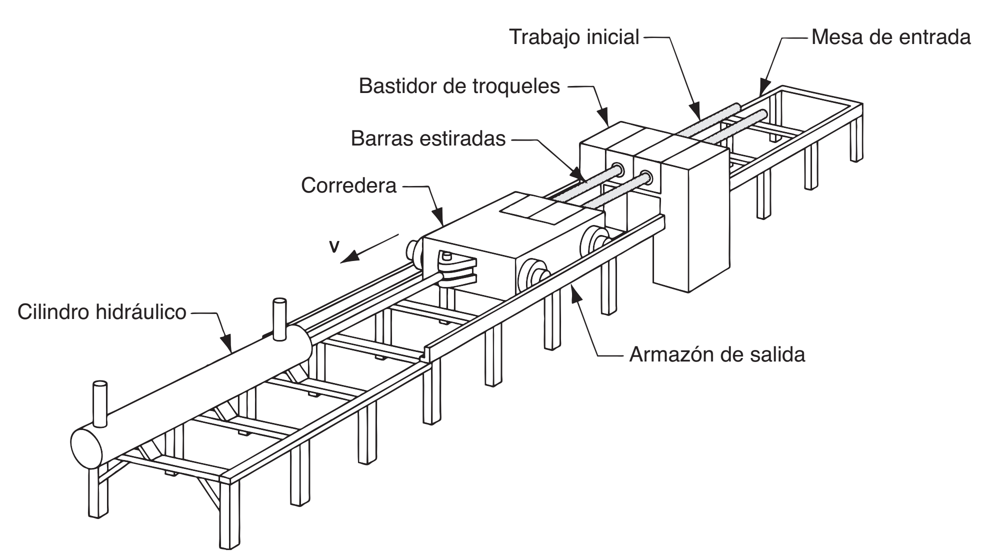
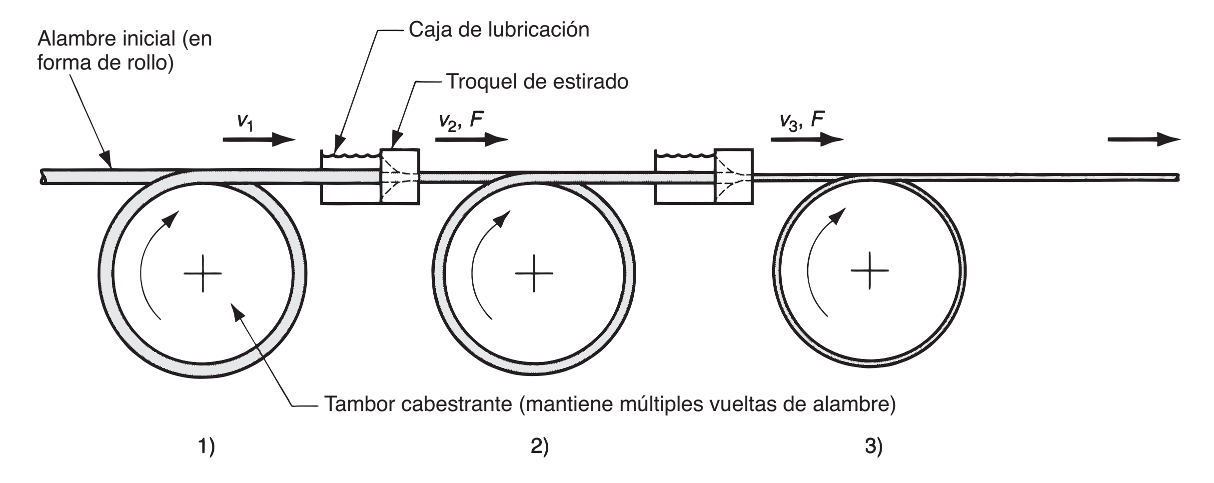


FIGURA 19.41 Banco de estirado operado hidráulicamente para estirado de barras metálicas.

como se ilustra en la figura 19.42. Cada tambor, llamado ***cabestrante o molinete***, es movido por un motor que provee la fuerza apropiada para estirar el alambre a través del troquel correspondiente. También mantiene una tensión regular en el alambre que pasa al siguiente troquel de estirado en la serie. Cada troquel realiza cierta reducción en el alambre, y así se alcanza la reducción total deseada en la serie. Algunas veces se requiere recocido del alambre entre los grupos de troqueles en la serie, dependiendo del metal que se procesa y de la reducción total que se realiza.

Troqueles de estirado La figura 19.43 identifica las características de un troquel típico de estirado. Las cuatro regiones del troquel que se pueden distinguir son las siguientes: 1) entrada, 2) ángulo de aproximación, 3) superficie del cojinete (campo), 4) relevo de salida. La región de ***entrada*** es generalmente una abertura en forma de campana que no entra en contacto con el trabajo. Su propósito es hacer un embudo lubricante en el troquel y prevenir el rayado en la superficie del trabajo y la superficie del troquel. La ***aproximación*** es donde ocurre el proceso de estirado. Es una abertura en forma de cono con un ángulo (medio ángulo) que fluctúa normalmente de 6º a 20º. El ángulo correcto varía de acuerdo

FIGURA 19.42 Estirado continuo de alambre.



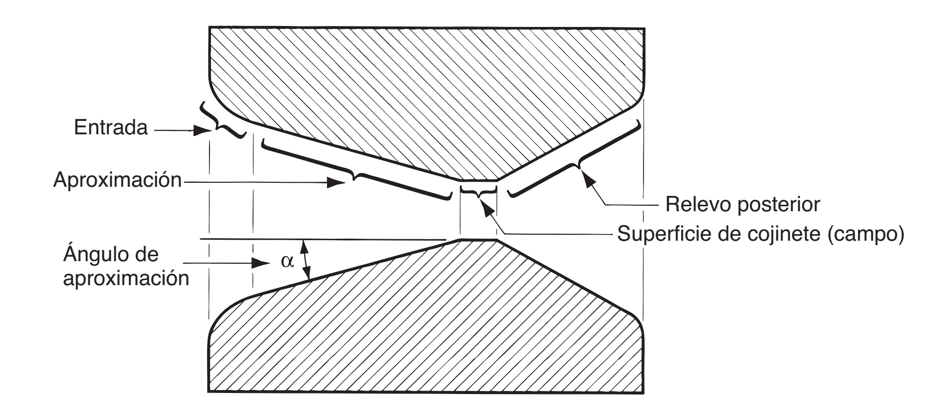


FIGURA 19.43 Troquel de estirado para barras redondas o alambre.

con el material de trabajo. La ***superficie del cojinete*** o ***campo*** determina el tamaño final del material estirado. Finalmente, el ***relevo posterior*** es la zona de salida. Se provee con un relevo hacia atrás con un ángulo de 30º. Los troqueles de estirado se hacen de acero de herramienta o carburo cementado. Los troqueles para alta velocidad en las operaciones de estirado de alambre usan frecuentemente insertos hechos de diamante (sintético o natural) para las superficies de desgaste.

Preparación del trabajo Antes del estirado, el material inicial debe prepararse adecuadamente. Esto involucra tres pasos: 1) recocido, 2) limpieza y 3) afilado. El propósito del recocido es incrementar la ductilidad del material para aceptar la deformación durante el estirado. Como ya se dijo, algunas veces se necesitan pasos de recocido en el estirado continuo. La limpieza del material se requiere para prevenir daños en la superficie de trabajo y en el troquel de estirado. Esto involucra la remoción de los contaminantes de la superficie (por ejemplo, capas de óxido y corrosión) por medio de baños químicos o limpieza con chorro de municiones. En algunos casos se prelubrica la superficie de trabajo después de la limpieza.

El ***afilado*** implica la reducción del diámetro del extremo inicial del material, de manera que pueda insertarse a través del troquel de estirado para iniciar el proceso; esto se logra generalmente mediante estampado, laminado o torneado. El extremo afilado del material se sujeta a las mordazas de la corredera o a otros dispositivos para iniciar el proceso de estirado.

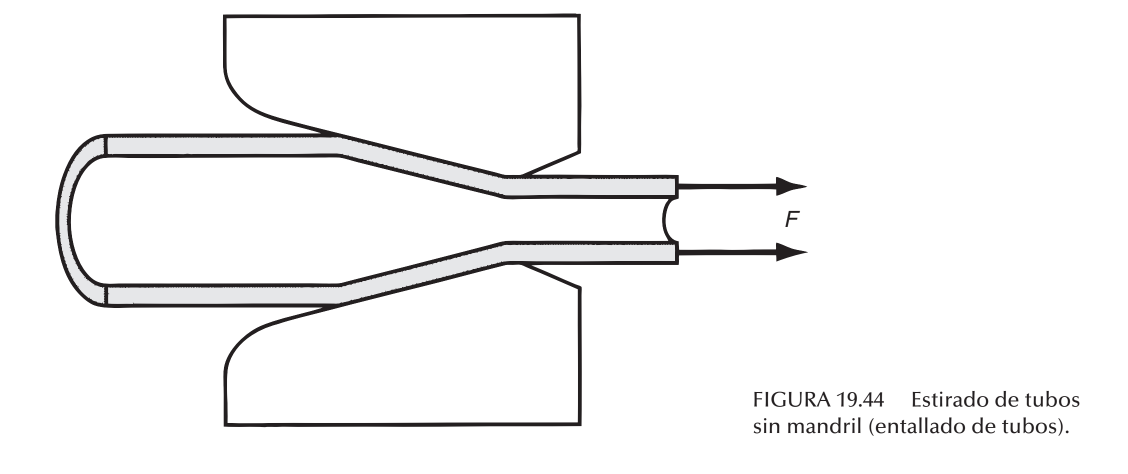


FIGURA 19.44 Estirado de tubos sin mandril (entallado de tubos).

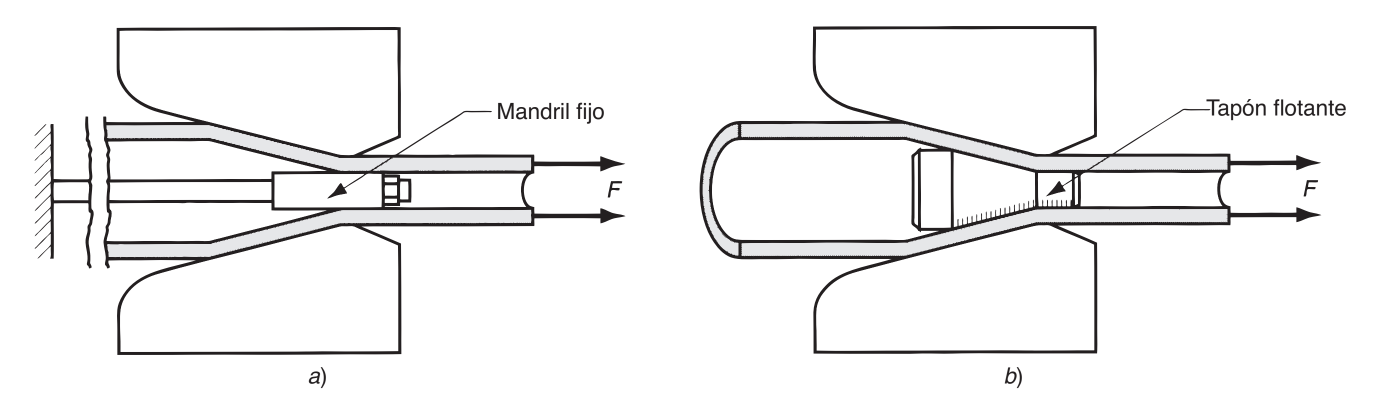


FIGURA 19.45 Estirado de tubos con mandriles: *a*) mandril fijo y *b*) tapón flotante.

19.6.3 Estirado de tubos

El proceso de estirado se puede usar para reducir el diámetro o el espesor de la pared de tubos y tuberías sin costura, después que se ha producido el tubo inicial por medio de alguna otra operación, como extrusión. El estirado del tubo se puede llevar a cabo con o sin mandril. El método más simple no usa mandril y se aplica para la reducción del diámetro, como se muestra en la figura 19.44. Algunas veces se usa el término ***entallado de tubo*** para esta operación.

El problema que surge cuando el tubo se estira sin utilizar un mandril, como se muestra en la figura 19.44, es que carece de control sobre el diámetro interno y sobre el espesor de la pared del tubo. Por esto se usan mandriles de varios tipos, dos de los cuales se ilustran en la figura 19.45. En el inciso a de la figura se usa un ***mandril fijo*** ajustado a una barra de soporte largo para fijar el diámetro interior y el espesor de la pared del tubo durante la operación. Las limitaciones prácticas sobre la longitud de la barra de soporte en este método restringen la longitud de los tubos que pueden estirarse. El segundo tipo que se muestra en el inciso *b*) usa un ***tapón flotante*** cuya forma se diseña de manera que encuentre su posición "natural" en la zona de reducción del troquel. Este método evita las limitaciones sobre la longitud de trabajo que presenta el método del mandril fijo.

REFERENCIAS

[1] Altan, T., Oh, S-I. y Gegel, H.L. ***Metal Forming: Fundamentals and Applications***. ASM International, Materials Park, Ohio, 1983.

[2] Avitzur, B. ***Metal Forming: Processes and Analysis***. Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, N.Y. 1979.

[3] Byrer, T. G., et al. (eds). ***Forging Handbook***. Forging Industry Association, Cleveland, Ohio; y American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1985.

[4] Cook, N. H. ***Manufacturing Analysis.*** Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1966.

[5] DeGarmo, E. P. Black, J. T. y Kohser, R. A. ***Materials and Processes in Manufacturing,*** 8a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1997.

[6] Groover, M. P. "An Experimental Study of the Work Components and Extrusion Strain in the Cold Forward Extrusion of Steel" ***Research Report***. Bethlehem Steel Corporation, 1966.

[7] Harris, J. N. ***Mechanical Working of Metals***. Pergamon Press, Oxford, England, 1983.

[8] Hosford, W. F. y Cadell, R. M. ***Metal Forming: Mechanics and Metallurgy***, 2a. ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1993.

[9] Jensen, J. E. (ed.). ***Forging Industry Handbook.*** Forging Industry Association, Cleveland, Ohio, 1970.

[10] Johnson, W. "The Pressure for the Cold Extrusion of Lubricated Rod Through Square Dies of Moderate Reduction at Slow Speeds" ***Journal of the Institute of Metals***. Vol. 85, 1956-1957.

[11] Kalpakjian, S. ***Mechanical Processing of Materials***, D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N.J., 1967. Capítulo 5.

[12] Kalpakjian, S. y Schmid, S. R. ***Manufacturing Processes for Engineering Materials,*** 4a. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2003.

[13] Lange, K. et al. (eds.). ***Handbook of Metal Forming.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1995.

[14] Laue, K. y Stenger, H. ***Extrusion: Processes, Machinery and Tooling***. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1981.

[15] Mielnik, E. M. ***Metalworking Science and Engineering***. McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1991.

[16] Roberts, W. L. ***Hot Rolling of Steel.*** Marcel Dekker, Inc. Nueva York, 1983.

[17] Roberts, W. L. ***Cold Rolling of Steel.*** Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1978.

[18] Schey, J. A. ***Introduction to Manufacturing Processes***. 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 2000.

[19] Wick, C., et al. (eds.). ***Tool and manufacturing Engineers Handbook***. 4a.ed. Vol. II: Forming, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

19.1. ¿Por qué razones comerciales y tecnológicas son importantes los procesos de deformación volumétrica?

19.2. Mencione los cuatro procesos básicos de la deformación volumétrica.

19.3. ¿Qué es el laminado en el contexto de los procesos de deformación volumétrica?

19.4. En el laminado del acero, ¿qué diferencias existen entre una lupia, una plancha y un tocho?

19.5. Mencione algunos de los productos fabricados en un molino laminador.

19.6. ¿Qué es el draft en una operación de laminado?

19.7. ¿Qué es la adherencia en una operación de laminado en caliente?

19.8. Identifique algunas de las formas para reducir la fuerza en el laminado plano.

19.9. ¿Qué es un laminador de dos rodillos?

19.10. ¿Qué es un molino reversible en laminado?

19.11. Identifique, además del laminado plano y laminado de perfiles, algunos procesos adicionales de formación volumétrica (masiva) que usan rodillos para efectuar la deformación.

19.12. ¿Qué es el forjado?

19.13. Una manera de clasificar las operaciones de forjado es por el grado en que el troquel restringe al material de trabajo. Mencione los tres tipos básicos de esta clasificación.

19.14. ¿Por qué es deseable la rebaba en el forjado con troquel impresor?

19.15. ¿Qué es una operación de recortado en el contexto de la impresión de troquel forjado?

19.16. ¿Cuáles son los dos tipos básicos de equipos de forja?

19.17. ¿Qué es el forjado isotérmico?

19.18. ¿Qué es la extrusión?

19.19. Distinga entre extrusión directa y extrusión indirecta.

19.20. Mencione algunos productos que se fabrican por extrusión.

19.21. ¿Por qué la fricción es un factor determinante en la fuerza del pisón en la extrusión directa y no lo es en la extrusión indirecta?

19.22. ¿Qué tienen en común el reventado central y el proceso de perforación de rodillos?

19.23. Defina el estirado de alambre y de barra.

19.24. A pesar de que la pieza de trabajo en una operación de estirado de alambre está obviamente sujeta a esfuerzos de tensión, ¿de qué forma los esfuerzos de compresión juegan también un papel importante en el proceso?

19.25. ¿Por qué en una operación de estirado de alambre, el esfuerzo de estirado nunca debe exceder el esfuerzo de fluencia del metal de trabajo?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 27 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

19.1. La pieza de trabajo inicial en el laminado de acero caliente de láminas es uno de los siguientes (una respuesta es correcta): *a*) barra, *b*) tocho, *c*) lupia, *d*) plancha o *e*) alambre.

19.2. ¿De cuál de los siguientes parámetros depende el máximo draft posible en una operación de laminado? (dos respuestas son correctas): *a*) coeficiente de fricción entre el rodillo y el trabajo, *b*) diámetro de los rodillos, *c*) velocidad de los rodillos, *d*) espesor del material, *e*) deformación y *f*) coeficiente de resistencia del metal de trabajo.

19.3. ¿Cuál de los parámetros de esfuerzo o resistencia siguientes se utiliza en el cálculo de la fuerza de laminado? (una respuesta es mejor): *a*) esfuerzo promedio al flujo, *b*) resistencia a la compresión, *c*) esfuerzo al flujo final, *d*) resistencia a la tensión o *e*) resistencia a la fluencia.

19.4. ¿Cuál de los siguientes tipos de molinos de rodillos se asocia con rodillos relativamente pequeños en contacto con el trabajo? (dos respuestas mejores) *a*) molino de rodillos en conjunto, *b*) molino laminador continuo, *c*) molino de cuatro rodillos, *d*) molino reversible o *e*) configuración de tres rodillos.

19.5. ¿Con cuál de los siguientes procesos de deformación masiva se asocia la producción de tubos y tuberías? (tres respuestas correctas). *a*) extrusión, *b*) punzonado, *c*) laminado de anillos, *d*) forjado con rodillos, *e*) perforación de rodillos, *f*) entallado de tubos o *g*) recalcado.

19.6. ¿Cuál de los siguientes parámetros de esfuerzo o resistencia se utiliza en el cálculo de la fuerza máxima en una operación de forjado? (una respuesta mejor): *a*) esfuerzo promedio a la fluencia, *b*) resistencia a la compresión, *c*) esfuerzo a la fluencia final, *d*) resistencia a la tensión o *e*) resistencia a la fluencia.

19.7. ¿Cuál de las operaciones siguientes está relacionada estrechamente con el forjado de troquel abierto? (tres mejores respuestas): *a*) forjado por secciones, *b*) forjado sin rebaba, *c*) forjado con troqueles convexos, *d*) forjado con troquel de impresión, *e*) proceso Mannesmann, *f*) forjado de precisión, *g*) recalentado y *h*) recalcado.

19.8. La rebaba en el forjado con troquel impresor no tiene ningún propósito y es indeseable porque tiene que recortarse de la pieza después de formada: *a*) verdadero o *b*) falso.

19.9. ¿Cuál de las siguientes opciones se clasifica como una operación de forja? (cuatro respuestas correctas). *a*) acuñado, *b*) forjado con troqueles convexos, *c*) extrusión por impacto, *d*) forjado con rodillos, *e*) estampado (suajeado), *f*) laminado de cuerdas, *g*) recortado y *h*) recalcado.

19.10. ¿Cuál de los siguientes son nombres alternos de la extrusión indirecta? (dos respuestas correctas): *a*) extrusión hacia atrás, *b*) extrusión directa, *c*) extrusión hacia delante, *d*) extrusión por impacto y *e*) extrusión invertida.

19.11. La producción de tubo es posible en extrusión indirecta, pero no en extrusión directa: *a*) verdadero o *b*) falso.

19.12. ¿Cuál de los siguientes parámetros de esfuerzo o resistencia se utiliza en el cálculo de la fuerza en una operación de extrusión? (una mejor respuesta): *a*) esfuerzo a la fluencia promedio, *b*) resistencia a la compresión, *c*) resistencia a la fluencia final, *d*) resistencia a la tensión o *e*) resistencia a la fluencia.

19.13. ¿En cuál de las operaciones de extrusión siguientes es la fricción un factor en la determinación de la fuerza de extrusión? (una mejor respuesta): *a*) extrusión directa, o *b*) extrusión indirecta.

19.14. Teóricamente la reducción máxima posible en una operación de estirado de alambre, bajo la suposición de material perfectamente plástico, sin fricción y sin trabajo redundante es: *a*) cero, *b*) 0.63, *c*) 1.0 o *d*) 2.72.

19.15. ¿Cuáles de los siguientes procesos de deformación volumétrica están involucrados en la producción de clavos para madera de construcción? (tres respuestas mejores): *a*) estirado de barras y alambres, *b*) extrusión, *c*) forjado sin rebaba, *d*) formado con troquel de impresión, *e*) laminado y *f*) recalcado.

19.16. ¿Con cuál de los cuatro procesos de deformación masiva se asocia la fórmula de Johnson? *a*) estirado de barras y alambres, *b*) extrusión, *c*) forjado y *d*) laminado.

PROBLEMAS

Laminado

19.1. Una placa de 42 mm de espesor fabricada de acero al bajo carbono se reduce a 34.0 mm en un paso de laminado. A medida que el espesor se reduce, la placa se engruesa 4%. El esfuerzo de fluencia de la placa de acero es de 174 MPa y la resistencia de tensión es de 290 MPa. La velocidad de entrada de la placa es de 15.0 m/min. El radio del carrete es de 325 mm y la velocidad de rotación es de 49.0 rev/min. Determine *a*) el coeficiente de fricción mínimo requerido que haría esta operación de laminado posible, *b*) la velocidad de salida de la placa y *c*) el deslizamiento hacia delante.

19.2. Una plancha de 2.0 in de grueso tiene 10 in de ancho y 12.0 ft de longitud. El espesor se reduce en tres pasos de laminación en caliente. Cada paso reduce la plancha 75% de su grueso anterior. Para este metal y esta reducción se espera un ensanchamiento de 3% en cada paso. Si la velocidad de entrada de la plancha en el primer paso es de 40 ft/min, y la velocidad de los rodillos es la misma para los tres pasos, determine *a*) la longitud y *b*) la velocidad de salida de la plancha después de la reducción final.

19.3. Se usa una serie de operaciones de laminado en frío para reducir el espesor de una placa de 50 a 25 mm en un molino reversible de 2 rodillos. El diámetro del rodillo es de 700 mm y el coeficiente de fricción entre los rodillos y el trabajo es de 0.15. La especificación es que el draft sea igual en cada paso. Determine *a*) el número mínimo de pases requerido y *b*) el draft para cada paso.

19.4. En el problema 19.3, suponga que está especificada una reducción porcentual igual en cada paso en lugar del draft: *a*) ¿cuál es el número mínimo de pases requerido? *b*) ¿cuál es el draft para cada paso?

19.5. Un molino laminador continuo en caliente tiene dos bastidores. El grueso de la placa inicial es de 25 mm y el ancho es de 300 mm. El espesor final será de 13 mm y el radio de cada bastidor de 250 mm. La velocidad de rotación del primer

bastidor es de 20 rev/min. En cada bastidor se producirán drafts iguales de 6 mm. La placa es lo suficientemente ancha en relación con su espesor para que no ocurra un incremento en la anchura. Bajo la suposición de que el deslizamiento hacia delante es igual en cada bastidor, determine *a*) la velocidad v_r en cada bastidor y *b*) el deslizamiento hacia delante *s*, *c*) determine también la velocidad de salida en cada bastidor de rodillos si la velocidad de entrada al primer bastidor es de 26 m/min.

19.6. Un molino de laminación en caliente tiene ocho bastidores. Las dimensiones de la plancha inicial son: espesor de 3.0 in, ancho de 15.0 in y longitud de 10.0 ft. El espesor final será de 0.3 in, el diámetro del rodillo en cada bastidor de 36 in y la velocidad de rotación en el bastidor número 1 de 30 rev/min. Se ha observado que la velocidad de la plancha que entra al bastidor número 1 es de 240 ft/min. Suponga que no ocurre ensanchamiento de la plancha durante la secuencia de laminado. La reducción porcentual del espesor es igual en cada bastidor y se supone que el deslizamiento hacia delante será igual en cada bastidor. Determine *a*) la reducción porcentual en cada bastidor, *b*) la velocidad de rotación de los rodillos en los bastidores del dos al ocho, *c*) el deslizamiento hacia delante, *d*) ¿cuál es el draft en los bastidores uno y ocho y *e*) ¿cuál es la longitud y velocidad de salida de la tira final que sale del bastidor ocho?

19.7. Una placa de 250 mm de ancho y 25 mm de espesor se reduce en un solo paso en un molino de dos rodillos a un espesor de 20 mm. El rodillo tiene un radio de 50 mm y su velocidad es de 30 m/min. El material de trabajo tiene un coeficiente de resistencia de 240 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.2. Determine *a*) la fuerza de laminación, *b*) el momento de torsión de laminación y *c*) la potencia requerida para realizar esta operación.

19.8. Resuelva el problema 19.7 utilizando un radio de rodillo de 250 mm.

19.9. Resuelva el problema 19.7 suponiendo un molino de rodillos en conjunto cuyos rodillos de trabajo tienen un radio de 50 mm. Compare los resultados con los dos problemas anteriores y note el importante efecto del radio de los rodillos sobre la fuerza, el momento de torsión y la potencia.

19.10. Una plancha de 4.50 in de grueso que tiene 9 in de ancho y 24 in de largo se reducirá en un solo paso en un molino de dos rodillos a un espesor de 3.87 in. El rodillo gira a una velocidad de 5.50 rev/min y tiene un radio de 17.0 in. El material de trabajo tiene un coeficiente de resistencia igual a 30 000 lb/in^2 y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.15. Determine *a*) la fuerza del laminado, *b*) el momento de torsión del laminado y *c*) la potencia requerida para realizar esta operación.

19.11. Una operación de laminado de un solo paso reduce una placa de 20 mm de grueso a 18 mm. La placa inicial tiene un ancho de 200 mm. El radio del rodillo es de 250 mm y la velocidad de rotación es de 12 rev/min. El material de trabajo tiene un coeficiente de resistencia de 600 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.22. Determine *a*) la fuerza de laminación, *b*) el momento de torsión de laminación y *c*) la potencia requerida para esta operación.

19.12. Un molino de laminación en caliente tiene rodillos cuyo diámetro es de 24 in. Puede ejercer una fuerza máxima de 40 000 libras. El molino tiene una potencia máxima de 100 hp. Se desea reducir una placa de 1.5 in de grueso al draft máximo posible en un paso. La placa inicial tiene 10 in de ancho. El material caliente tiene un coeficiente de resistencia de 20 000 lb/in^2 y un exponente de endurecimiento por deformación de 0. Determine *a*) el draft máximo posible, *b*) la deformación real asociada y *c*) la velocidad máxima de los rodillos para esta operación.

19.13. Resuelva el problema 19.12, excepto porque la operación es laminado en caliente encima de la temperatura de cristalización y el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.18. Suponga que el coeficiente de resistencia permanece en un valor de 20 000 lb/in^2.

Forjado

19.14. Una pieza cilíndrica es recalcada en un troquel abierto. El diámetro inicial es de 45 mm y la altura inicial es de 40 mm. La altura después del forjado es de 25 mm. El coeficiente de fricción en la interfaz troquel-trabajo es de 0.20. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por un coeficiente de resistencia de 600 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.12. Determine la fuerza instantánea en la operación: *a*) en el momento en que se alcanza el punto de fluencia (fluencia a la deformación de 0.002). *b*) si h = 35 mm y *c*) si h = 25 mm.

19.15. Una pieza cilíndrica se recalca en frío en un troquel abierto con D = 2.5 in y h = 2.5 in y una altura final de 1.5 in. El coeficiente de fricción en la interfaz troquel-trabajo es de 0.10. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por K = 40 000 lb/in^2 y n = 0.15. Determine la fuerza instantánea en la operación: *a*) cuando se alcanza el punto de fluencia (fluencia a la deformación de 0.002), *b*) h = 2.3 in, *c*) h = 1.9 in y *d*) h = 1.5 in.

19.16. Una pieza de trabajo tiene un diámetro de 2.5 in y una altura de 4.0 in Se recalca a una altura de 2.75 in. El coeficiente de fricción en la interfaz troquel-trabajo = 0.10. El material de trabajo tiene una curva de fluencia con un coeficiente de resistencia es de 25 000 lb/in^2 y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.22. Construya una gráfica de fuerza contra altura del trabajo.

19.17. Se ejecuta una operación de encabezamiento en frío para producir la cabeza de un clavo de acero. El coeficiente de resistencia del acero es 600 MPa y el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.22. El coeficiente de fricción en la interfaz troquel-trabajo = 0.14. El alambre del cual se hace el clavo es de 5.00 mm de diámetro. La cabeza tiene un diámetro de 9.5 mm y un espesor de 1.6 mm. La longitud final del clavo es de 120 mm. *a*) ¿qué longitud de alambre se debe proyectar fuera del troquel para proveer el volumen suficiente de material para esta operación de recalcado?, *b*) calcule la fuerza mínima que debe aplicar el punzón para formar la cabeza en esta operación de troquel abierto.

19.18. Consiga un clavo común grande de cabeza (cabeza plana). Mida el diámetro de la cabeza y su espesor así como el diámetro del rabo del clavo, *a*) ¿qué longitud de material debe proyectarse fuera del troquel para proveer el suficiente material

para producir el clavo?, *b*) usando los valores apropiados para el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación del metal con el que se produce el clavo (tabla 3.4), calcule la fuerza máxima en la operación de encabezado para formar la cabeza.

19.19. Una operación de recalcado en caliente se ejecuta en un troquel abierto. El tamaño inicial de la pieza es D_o = 25 mm y h_o = 50 mm. La pieza se recalca a un diámetro = 50 mm. A esta elevada temperatura, el metal de trabajo fluye a 85 MPa (n = 0). El coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel es de 0.40. Determine *a*) la altura final de la pieza, *b*) la fuerza máxima en la operación.

19.20. Una prensa hidráulica de forja es capaz de ejercer una fuerza máxima de 1 000 000 N. Una pieza cilíndrica se recalca en frío. La pieza inicial tiene un diámetro de 30 mm y una altura de 30 mm. La curva de fluencia del metal se define por K = 400 MPa y n = 0.2. Determine la reducción máxima en altura a la que puede ser comprimida la pieza con la prensa, si el coeficiente de fricción es de 0.1.

19.21. Se diseña una pieza para forjarse en caliente en un troquel impresor. El área proyectada de la pieza, incluida la rebaba, es de 16 in^2. Después del cortado, la pieza tendrá un área proyectada de 10 in^2. La configuración geométrica de la pieza es compleja. El material fluye a 10 000 lb/in^2 al calentarse y no tiende a endurecerse por deformación. A temperatura ambiente, el material fluye a 25 000 lb/in^2. Determine la fuerza máxima requerida para ejecutar la operación de forjado.

19.22. Una biela se diseña para forjado en caliente en un troquel impresor. El área proyectada de la pieza es de 6 500 mm^2. El diseño del troquel ocasionará la formación de rebaba durante el forjado, así que el área, incluida la rebaba, será de 9 000 mm^2. La forma de la pieza es compleja. Al calentarse el material de trabajo fluye a 75 MPa y no tiende a endurecerse por deformación. Determine la fuerza máxima requerida para ejecutar la operación.

Extrusión

19.23. Un tocho cilíndrico de 100 mm de longitud y 50 mm de diámetro se reduce por extrusión indirecta (inversa) a 20 mm de diámetro. El ángulo del troquel es de 90º. En la ecuación de Johnson a = 0.8 y b = 1.4 y la curva de fluencia para el material de trabajo tiene un coeficiente de resistencia de 800 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.13. Determine *a*) la relación de extrusión, *b*) la deformación real (deformación homogénea), *c*) la deformación de extrusión, *d*) la presión del pisón y *e*) la fuerza del pisón.

19.24. Un tocho cilíndrico de 3 in de largo y 1.5 in de diámetro se reduce por extrusión indirecta a un diámetro de 0.375 in. El ángulo del troquel es de 90º. Si la ecuación de Johnson tiene a = 0.8 y b = 1.5 y la curva de fluencia para el material de trabajo es K = 75 000 lb/in^2 y n = 0.25, determine: *a*) la relación de extrusión, *b*) la deformación real (deformación homogénea), *c*) la deformación por extrusión, *d*) la presión del pisón, *e*) la fuerza del pisón y *f*) la potencia si la velocidad del pisón es de 20 in/min.

19.25. Un tocho tiene de longitud 75 mm y un diámetro de 35 mm se extruye directamente a un diámetro de 20 mm. El troquel de extrusión tiene un ángulo de 75º. Para el metal de trabajo, K = 600 MPa y n = 0.25. En la ecuación de esfuerzo por extrusión de Johnson a = 0.8 y b = 1.4, determine *a*) la relación de extrusión, *b*) la deformación real (deformación homogénea), *c*) la deformación de extrusión y *d*) la presión del pisón a L = 70, 40 y 10 mm.

19.26. Un tocho de 2 in de longitud y con un diámetro de 1.25 in se extruye directamente a un diámetro de 0.50 in. El ángulo de extrusión del troquel es de 90º. Para el metal de trabajo, K = 45 000 lb/in^2 y n = 0.20. En la ecuación de deformación por extrusión de Johnson a = 0.8 y b = 1.5, determine *a*) la relación de extrusión, *b*) la deformación real (deformación homogénea), *c*) la deformación por extrusión y *d*) la presión del pisón a L = 2.0, 1.5, 0.5 y cero in.

19.27. Una operación de extrusión directa se ejecuta sobre un tocho cilíndrico con un diámetro inicial de 2.0 in y una longitud inicial de 4.0 in El ángulo del troquel es de 60º y el diámetro del orificio es de 0.50 in. En la ecuación de Johnson a = 0.8 y b = 1.5. La operación se lleva a cabo en caliente y el metal caliente fluye a 13 000 lb/in^2 y no se endurece a la deformación cuando se calienta. *a*) ¿Cuál es la relación de extrusión? *b*) Determine la posición del pisón cuando el metal se comprime dentro del cono del troquel y empieza a extruir a través de la abertura del troquel, *c*) ¿cuál es la presión del pisón correspondiente a esta posición?, *d*) Asimismo, determine la longitud de la pieza final si el pisón detiene su movimiento hacia delante al inicio del cono del troquel.

19.28. Un proceso de extrusión indirecta empieza con un tocho de aluminio de 2.0 in de diámetro y 3.0 in de largo. La sección transversal final después de la extrusión es un cuadrado de 1.0 in por lado. El ángulo del troquel es de 90º. La operación se realiza en frío y el coeficiente de resistencia del metal es K = 26 000 lb/in^2 y el coeficiente de endurecimiento por deformación n = 0.20. En la ecuación de deformación por extrusión de Johnson, a = 0.8 y b = 1.2. *a*) Calcule la relación de extrusión, la deformación real y la deformación por extrusión, *b*) ¿cuál es el factor de forma del producto?, *c*) si el tope que se deja en el recipiente al final de la carrera es de 0.5 in de grueso, ¿cuál es la longitud de la sección extruida?, *d*) determine la presión del pisón en el proceso.

19.29. Se extruye directamente un perfil estructural en forma de L a partir de un tocho de aluminio en el cual L_o = 250 mm y D_o = 88 mm. Las dimensiones de la sección transversal se dan en la figura P19.29. El ángulo del troquel es de 90º. Determine *a*) la relación de extrusión, *b*) el factor de forma, *c*) la longitud del perfil extruido si el tope remanente en el recipiente al final de la carrera del pisón es de 25 mm.

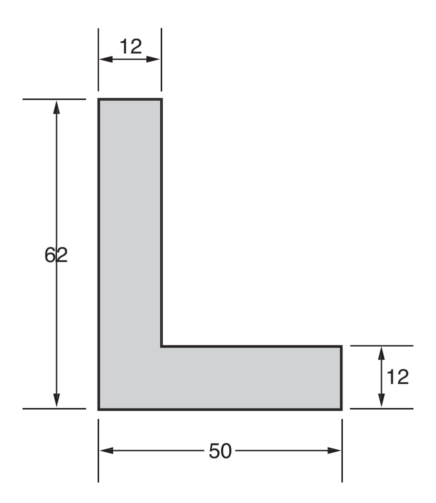


FIGURA P19.29 Pieza para el problema 19.29 (dimensiones en mm).

19.30. Los parámetros de la curva de fluencia para la aleación de aluminio del problema 21.29 son $K = 240$ MPa y $n = 0.16$. Si el ángulo del troquel en esta operación es de 90º y la correspondiente ecuación de deformación de Johnson tiene las constantes $a = 0.8$ y $b = 1.5$, calcule la fuerza máxima requerida para impulsar el pisón hacia el principio de la extrusión.

19.31. Una pieza en forma de copa se extruye hacia atrás a partir de un pedazo de aluminio que tiene 50 mm de diámetro. Las dimensiones finales de la copa son: DE = 50 mm, DI = 40 mm, altura = 100 mm y espesor de la base = 5 mm. Determine *a*) la relación de extrusión, *b*) el factor de forma, *c*) la altura del pedazo inicial requerido para lograr las dimensiones finales, *d*) si el metal tiene como parámetros de la curva de fluencia $K = 400$ MPa y $n = 0.25$, y las constantes de la ecuación de deformación por extrusión de Johnson son $a = 0.8$ y $b = 1.5$, determine la fuerza de extrusión.

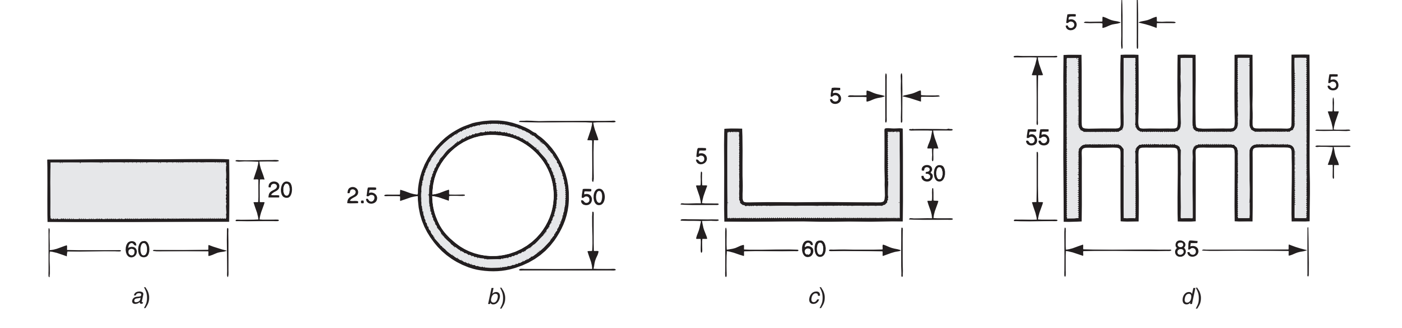
19.32. Determine el factor de forma para cada una de las formas del orificio de extrusión que se ilustran en la figura P19.32.

Estirado

19.33. Se estira un alambre con un diámetro inicial de 2.5 mm. Se estira por medio de un troquel con una abertura de 2.1 mm. El ángulo de entrada del troquel es de 18º. El coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel es de 0.08. El metal de trabajo tiene un coeficiente de resistencia de 450 MPa y un exponente de deformación por endurecimiento de 0.26. El estirado se lleva a cabo a temperatura ambiente. Determine *a*) el área de reducción, *b*) el esfuerzo de estirado y *c*) la fuerza de estirado requerida para la operación.

19.34. Un material en barra con un diámetro inicial de 0.5 in se estira mediante un troquel con un ángulo de entrada de 13º. El diámetro final de la barra es de 0.375 in. El metal tiene un coeficiente de resistencia de 40 000 lb/in2 y un exponente de deformación por endurecimiento de 0.20. El coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel es de 0.1. Determine *a*) la reducción del área, *b*) la fuerza de estirado para la operación y *c*) los caballos de potencia para realizar la operación si la velocidad de salida es de 2 ft/s.

FIGURA P19.32 Formas de la sección transversal para el problema 19.32 (las dimensiones están dadas en milímetros); *a*) barra rectangular, *b*) tubo, *c*) canal y *d*) aletas de enfriamiento.



19.35. Un material en barra con un diámetro inicial de 90 mm se estira con un draft de 15 mm. El troquel de estirado tiene un ángulo de entrada de 18º y su coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel es de 18º. El metal se comporta como un material plástico perfecto con un esfuerzo a la fluencia de 105 MPa. Determine *a*) la reducción del área, *b*) el esfuerzo de estirado, *c*) la fuerza de estirado requerida para la operación y *d*) la potencia para realizar la operación si la velocidad de salida es de 1.0 m/min.

19.36. Un alambre cuyo diámetro inicial es de 0.125 in se estira a través de dos troqueles, produciendo cada troquel una reducción de área de 0.20. El metal inicial tiene un coeficiente de resistencia de 40 000 lb/in^2 y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.15. Cada troquel tiene un ángulo de entrada de 12º y el coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel se estima que tiene un valor de 0.10. Los motores que impulsan los cabestrantes a la salida del troquel pueden entregar 1.50 hp a 90% de eficiencia. Determine la velocidad máxima posible del alambre al salir del segundo troquel.

20 TRABAJADO METÁLICO DE LÁMINAS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

El trabajo metálico de láminas incluye operaciones de corte y formado realizadas sobre láminas delgadas de metal. Los espesores del material típicos están entre 0.4 mm (1/64 de in) y 6 mm (1/4 de in). Cuando el espesor excede de 6 mm se le llama placa en lugar de lámina. El material de lámina o placa que se usa en el trabajo metálico de láminas se produce por laminado (sección 19.1).

La importancia comercial del trabajo con láminas es significativa. Considere el número de productos industriales y de consumo que incluyen piezas de lámina metálica: carrocerías de automóviles y camiones, aeroplanos, carros de ferrocarril y locomotoras, equipo de construcción y agrícola, utensilios pequeños y grandes, muebles y equipo de oficina, etcétera. Aunque estos ejemplos son obvios debido a que tienen lámina en su exterior, muchos componentes internos de estos productos se hacen también de láminas o placas. Las piezas de lámina de metal se caracterizan generalmente por su alta resistencia, buena precisión dimensional, buen acabado superficial y bajo costo relativo. Se pueden diseñar operaciones de producción masiva de lámina para grandes cantidades de componentes que se requieren en muchos de los productos arriba mencionados.

La mayoría de los procesos con láminas metálicas se realiza a temperatura ambiente (trabajo en frío), excepto cuando el material es grueso, frágil o la deformación es significativa. Éstos son los casos usuales de trabajo en caliente debajo de la temperatura de cristalización más que trabajo en caliente por encima de dicha temperatura.

Las tres grandes categorías de los procesos de láminas metálicas son: 1) corte, 2) doblado y 3) embutido. El corte se usa para separar láminas grandes en piezas menores, para cortar un perímetro o hacer agujeros en una pieza. El doblado y el embutido se usan para transformar láminas de metal en piezas de forma especial.

La mayoría de las operaciones con láminas metálicas se ejecutan en máquinas herramienta llamadas ***prensas***. Se usa el término ***prensa de estampado*** para distinguir estas prensas de las prensas de forjado y extrusión. Las herramientas que se usan para realizar el trabajo en láminas se llaman ***punzón y troquel***; también se usa el término ***troquel estampado***. Los productos hechos de lámina se llaman ***troquelados*** o ***estampados***. Para facilitar la producción en masa, las láminas de metal se introducen en las prensas frecuentemente en forma de tiras o rollos. En la sección 20.5 se describen varios tipos de herramientas de troquel y punzón, así como prensas de estampado. En las secciones finales del capítulo se describen varias operaciones que no utilizan las herramientas convencionales de punzón y troquel, muchas de las cuales no se realizan en prensas de estampado.

20.1 OPERACIONES DE CORTE

El corte de lámina se realiza por una acción de cizalla entre dos bordes afilados de corte. La acción de cizalla se describe en los cuatro pasos esquematizados en la figura 20.1, donde el borde superior de corte (el punzón) se mueve hacia abajo sobrepasando el borde estacionario inferior de corte (el troquel). Cuando el punzón empieza a empujar el trabajo, ocurre una ***deformación plástica*** en las superficies de la lámina; conforme éste se mueve hacia abajo, ocurre la ***penetración***, en la cual comprime la lámina y corta el metal. Esta zona de penetración es generalmente una tercera parte del espesor de la lámina. A medida que el punzón continúa su viaje dentro del trabajo, se inicia la ***fractura*** en éste entre los dos bordes de corte. Si el espacio entre el punzón y el troquel es correcto, las dos líneas de fractura se encuentran y el resultado es una separación limpia de trabajo en dos piezas.

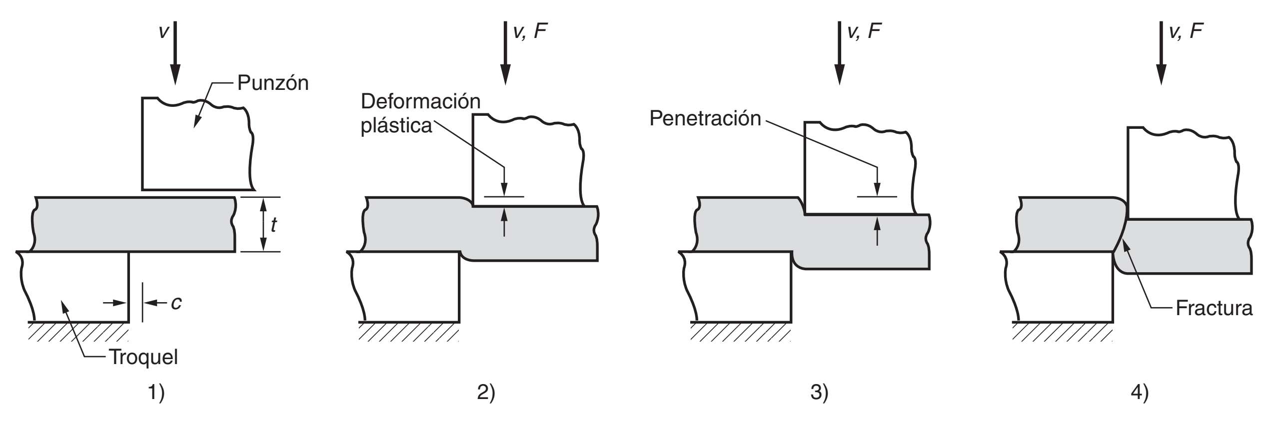


FIGURA 20.1 Cizallado o corte de una lámina metálica entre dos bordes cortantes: 1) inmediatamente antes de que el punzón entre en contacto con el material, 2) el punzón comienza a oprimir el trabajo causando deformación plástica, 3) el punzón comprime y penetra en el trabajo formando una superficie lisa de corte y 4) se inicia la factura entre los dos bordes de corte opuestos que separan la lámina. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente, *t* = espesor del material, *c* = espacio.

Los bordes cizallados de la lámina tienen formas características que se muestran en la figura 20.2. Encima de la superficie de corte hay una región que se llama ***redondeado***. Éste corresponde a la depresión hecha por el punzón en el trabajo antes de empezar el corte. Aquí es donde empieza la deformación plástica del trabajo: justo abajo del redondeado hay una región relativamente lisa llamado ***bruñido***. Ésta resulta de la penetración del punzón en el material antes de empezar la fractura. Debajo del bruñido está la ***zona de fractura***, una superficie relativamente tosca del borde de corte donde el movimiento continuo del punzón hacia abajo causa la fractura del metal. Por último, al fondo del borde está la ***rebaba***, un filo causado por la elongación del metal durante la separación final de las dos piezas.

20.1.1 Cizallado, punzonado y perforado

Hay tres operaciones principales en el trabajo de prensa que cortan el metal por el mecanismo de cizalla que se acaba de describir: el cizallado, el punzonado y el perforado.

El ***cizallado*** es la operación de corte de una lámina de metal a lo largo de una línea recta entre dos bordes de corte, como se muestra en la figura 20.3. El cizallado se usa típicamente para reducir grandes láminas a secciones más pequeñas para operaciones posteriores de prensado. Se ejecuta en una máquina llamada ***cizalla de potencia*** o ***cizalla recta***. La cuchilla superior de la cizalla de potencia está frecuentemente sesgada, como se muestra en la figura 20.3b, para reducir la fuerza requerida de corte.

El ***punzonado*** implica el corte de una lámina de metal a lo largo de una línea cerrada en un solo paso para separar la pieza del material circundante, como se muestra en la figura 20.4*a*). La pieza que se corta es el producto deseado en la operación y se designa como la ***parte o pieza deseada***. El ***perforado*** es muy similar al punzonado, excepto porque la pieza que se corta se desecha y se llama ***pedacería***. El material remanente es la pieza deseada. La distinción se ilustra en la figura 20.4*b*).

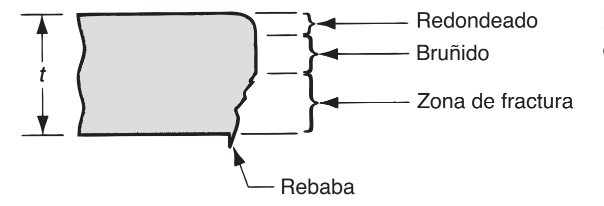


FIGURA 20.2 Bordes cizallados característicos del material de trabajo.

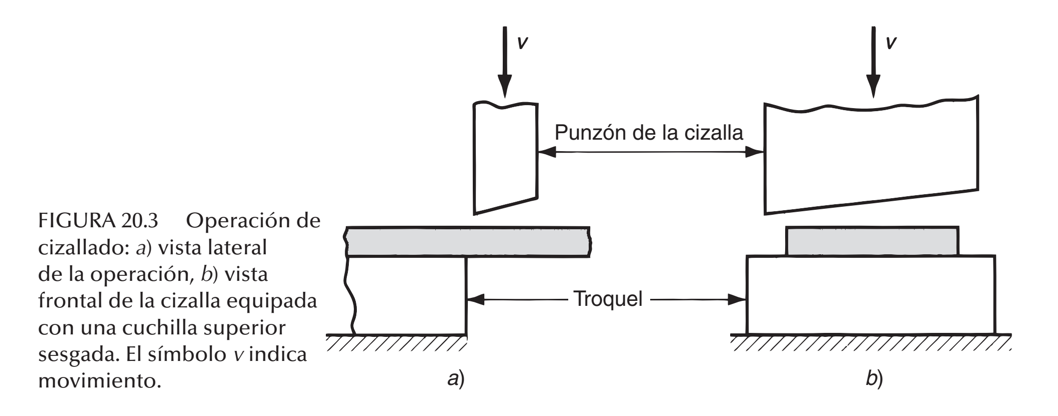


FIGURA 20.3 Operación de cizallado: *a*) vista lateral de la operación, *b*) vista frontal de la cizalla equipada con una cuchilla superior sesgada. El símbolo *v* indica movimiento.

20.1.2 Análisis de ingeniería del corte de láminas metálicas

Los parámetros importantes en el corte de láminas metálicas son el espacio entre el punzón y el troquel, el espesor del material, el tipo de metal y su resistencia, y la longitud del corte. A continuación se examinan algunos aspectos relacionados.

Espacio En una operación, el ***espacio*** *c* es la distancia entre el punzón y el troquel, tal como se muestra en la figura 20.1*a*). Los espacios típicos en el prensado convencional fluctúan entre 4 y 8% del espesor de la lámina metálica *t*. El efecto de los espacios inapropiados se ilustra en la figura 20.5. Si el espacio es demasiado pequeño, las líneas de fractura tienden a pasar una sobre otra, causando un doble bruñido y requiriendo mayor fuerza de corte. Si éste es demasiado grande, los bordes de corte pellizcan el metal y da por resultado una rebaba excesiva. En operaciones especiales que requieren bordes muy rectos, como en el rasurado y el perforado (sección 20.1.3), el espacio es solamente 1% del espesor del material.

El espacio correcto depende del tipo de lámina y su espesor. El que se recomienda se puede calcular mediante la fórmula siguiente:

$$C = A_c t \tag{20.1}$$

donde c = espacio, mm (in); A_c = tolerancia del espacio; y t = espesor del material, mm (in). La tolerancia se determina de acuerdo con el tipo de material. Los materiales se clasifican por conveniencia en tres grupos dados en la tabla 20.1, con un valor de tolerancia asociado a cada grupo.

Los valores calculados del espacio se pueden aplicar al punzonado convencional y a las operaciones de perforado de agujeros para determinar los tamaños del punzón y del troquel adecuados. Es evidente que la abertura del troquel debe ser siempre más grande que el tamaño del punzón. La adición del valor del espacio al tamaño del troquel o su resta del

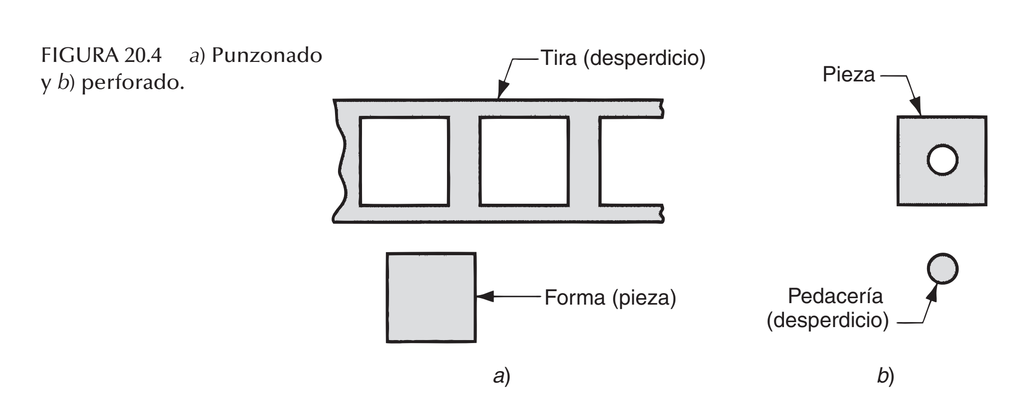


FIGURA 20.4 *a*) Punzonado y *b*) perforado.

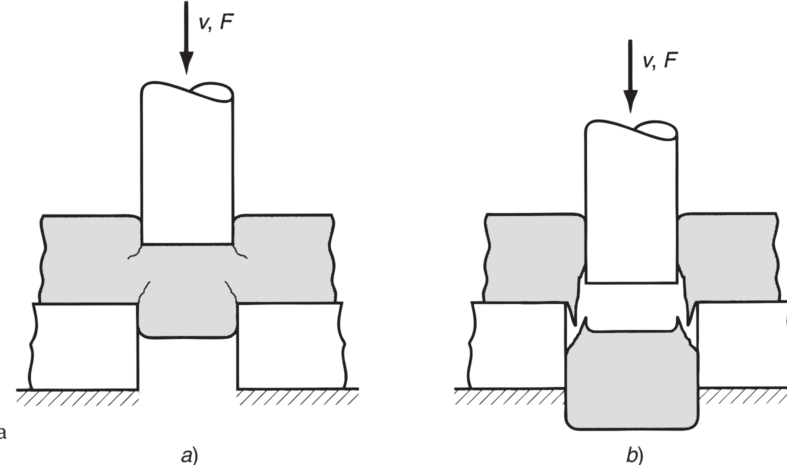


FIGURA 20.5 Efecto del espacio: *a*) uno demasiado pequeño ocasiona una fractura poco menos que óptima y fuerzas excesivas, *b*) uno demasiado grande ocasiona rebaba más grande. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.

tamaño del punzón depende de que la pieza que se corta sea un disco o pedacería, como se ilustra en la figura 20.6, para una pieza circular. Debido a la forma del borde cizallado, la dimensión exterior de la pieza que se corta de la lámina será más grande que el tamaño del agujero; por tanto, el tamaño del punzón y del troquel para una forma o pieza redonda de diámetro D_b se determina como sigue:

$$\text{Diámetro del punzón de corte de formas} = D_b - 2c \tag{20.2a}$$

$$\text{Diámetro del troquel de corte de formas} = D_b \tag{20.2b}$$

Los tamaños del troquel y del punzón para un agujero redondo de diámetro D_h se determinan como sigue:

$$\text{Diámetro del punzón para corte de agujeros} = D_h \tag{20.3a}$$

$$\text{Diámetro del troquel para corte de agujeros} = D_h + 2c \tag{20.3b}$$

Para que las formas o la pedacería caigan a través del troquel, la abertura de éste debe tener un ***espacio angular*** entre 0.25º y 1.5º de cada lado. El espacio angular se muestra en la figura 20.7.

Fuerzas de corte Es importante estimar la fuerza de corte porque ésta determina el tamaño (tonelaje) de la prensa necesaria. La fuerza de corte F en el trabajo de láminas puede determinarse por:

$$F = StL \tag{20.4}$$

donde S = resistencia al corte de la lámina, MPa (lb/in^2); t = espesor del material, mm (in) y L = longitud del borde de corte, mm (in). En el punzonado, perforado, rasurado y operaciones similares, L es la longitud del perímetro de la forma o agujero que se corta. En la determinación de L se puede anular el efecto menor del espacio.

TABLA 20.1 Valor de las tolerancias para los tres grupos de láminas metálicas.

Grupo metálico	A_c
Aleaciones de aluminio 1100S y 5052S, todos los temples	0.045
Aleaciones de aluminio 2024ST y 6061ST; latón, todos los temples; acero suave laminado en frío; acero inoxidable frío	0.060
Acero laminado en frío, dureza media; acero inoxidable, dureza media y alta	0.075

Recopilado de [2].

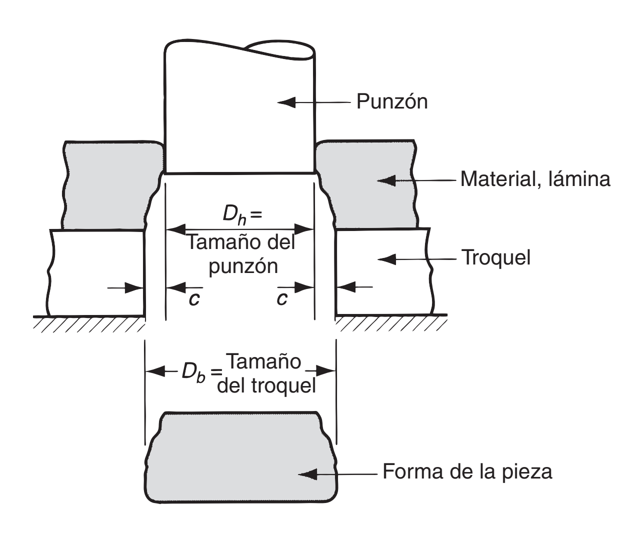


FIGURA 20.6 El tamaño del troquel determina el tamaño de la forma D_b; el tamaño del punzón determina el tamaño del agujero D_h; c = Espacio.

Si se desconoce la resistencia al corte, se puede estimar la fuerza de corte mediante el uso de la resistencia a la tensión, de la siguiente manera:

$$F = 0\ 7\ TSt\ L$$

donde TS = resistencia última a la tensión, MPa (lb/in^2).

En las ecuaciones anteriores para estimar la fuerza de corte, se supone que el corte entero se hace al mismo tiempo a todo lo largo L del borde de corte. En este caso la fuerza de corte será un máximo. Es posible reducir la fuerza máxima usando un borde de corte sesgado en el punzón o en el troquel, como se muestra en la figura 20.3*b*). El ángulo (llamado ***ángulo de corte***) distribuye el corte en el tiempo y reduce la fuerza que se experimenta a cada momento. De cualquier manera, la energía total requerida en la operación es la misma, ya sea que se concentre en un breve momento o se distribuya sobre un periodo más largo.

EJEMPLO 20.1 Espacio en el punzonado y fuerza

Se corta un disco de 150 mm de diámetro de una tira de acero de 3.2 mm, laminado en frío medio endurecido, cuya resistencia al corte es de 310 MPa. Determine: *a*) los diámetros apropiados del punzón y del troquel y *b*) la fuerza del punzonado.

Solución: *a*) La tolerancia del espacio para acero laminado en frío de dureza media es A_c = 0.075. Por consiguiente, el espacio es:

$$c = 0.075(3.2\text{ mm}) = \mathbf{0.24\ mm}$$

El disco tendrá un diámetro de 150 mm y el tamaño del troquel determina el tamaño de la forma; por tanto,

Diámetro de la abertura del troquel = **150.00 mm**

Diámetro del punzón = 150 – 2(0.24) = **149.52 mm**

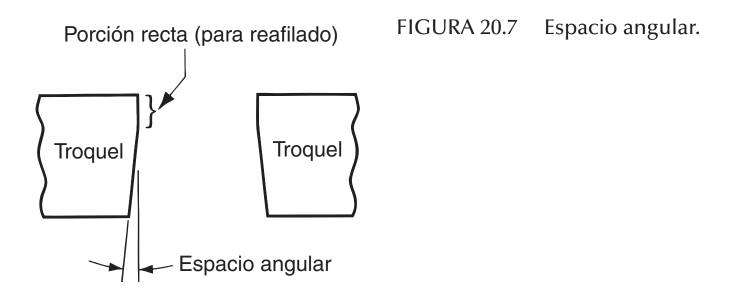


FIGURA 20.7 Espacio angular.

b) Para determinar la fuerza de punzonado, se supone que el perímetro entero de la forma se corta en una sola operación. La longitud del borde de corte es:

$$L = \pi D_b = 150\pi = 471.2 \text{ mm}$$

y la fuerza es:

$$F = 310(471\ 2)(3\ 2) = \mathbf{467\ 469\ N} \text{ (Esto es aproximadamente igual a 53 tons)}$$

20.1.3 Otras operaciones de corte de láminas metálicas

Además del cizallado, punzonado y perforado, hay algunas otras operaciones de corte en el prensado. El mecanismo de corte en cada caso involucra las mismas operaciones de corte analizadas previamente.

Corte en trozos y partición El ***corte*** en trozos es una operación de corte en el que las piezas se separan de una tira de lámina metálica cortando los troqueles opuestos de la pieza en secuencia, como se muestra en la figura 20.8*a*). Cada corte produce una nueva pieza. Las características que distinguen la operación de corte en trozos del corte convencional son: 1) los bordes de corte no son necesariamente rectos, y 2) las piezas se pueden empalmar en la tira de tal manera que se evite el desperdicio.

La ***partición*** involucra el corte de una tira de lámina de metal por un punzón con dos bordes de corte que coinciden con los lados opuestos de la pieza, como se muestra en la figura 20.8*b*). Esto puede requerirse cuando los contornos de la pieza tienen forma irregular que impiden su empalme perfecto en la tira. La partición es menos eficiente que el corte en trozos debido a que produce algún material de desperdicio.

Ranurado, perforado múltiple y muescado El término ***ranurado*** se usa algunas veces para la operación de punzonado en la cual se corta un agujero rectangular o alargado, como se muestra en la figura 20.9*a*). El ***perforado*** múltiple involucra la perforación simultánea de varios agujeros en una lámina de metal, como se muestra en la figura 20.9*b*). El patrón de agujeros tiene generalmente propósitos decorativos o para permitir el paso de luz, gases o fluidos.

Para obtener el contorno deseado de una forma, se cortan frecuentemente porciones de lámina por muescado o semimuescado. El ***muescado*** es el corte de una porción del metal en un lado de la lámina o tira. El ***semimuescado*** recorta una porción del metal del

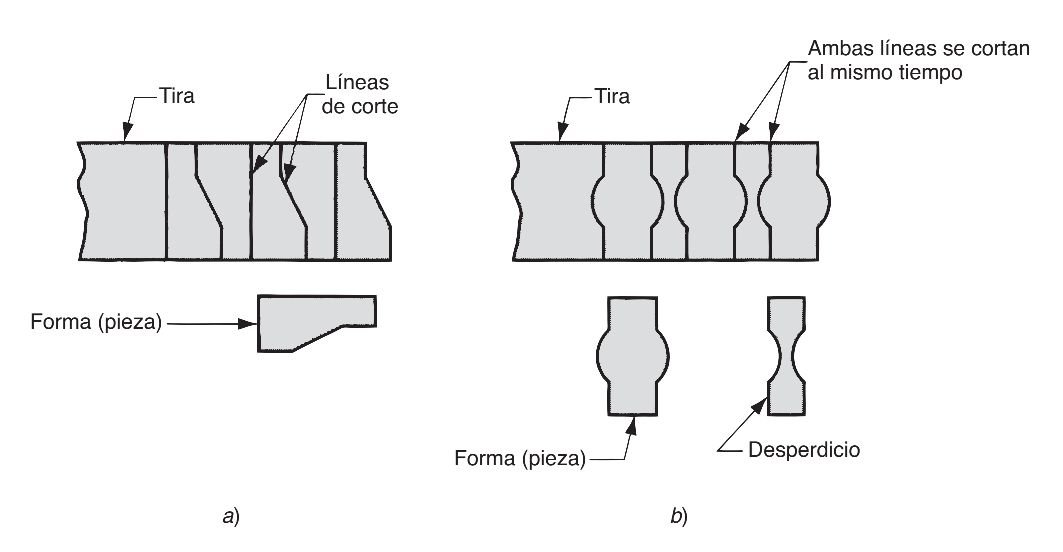


FIGURA 20.8 *a*) Corte en trozos y *b*) partición.

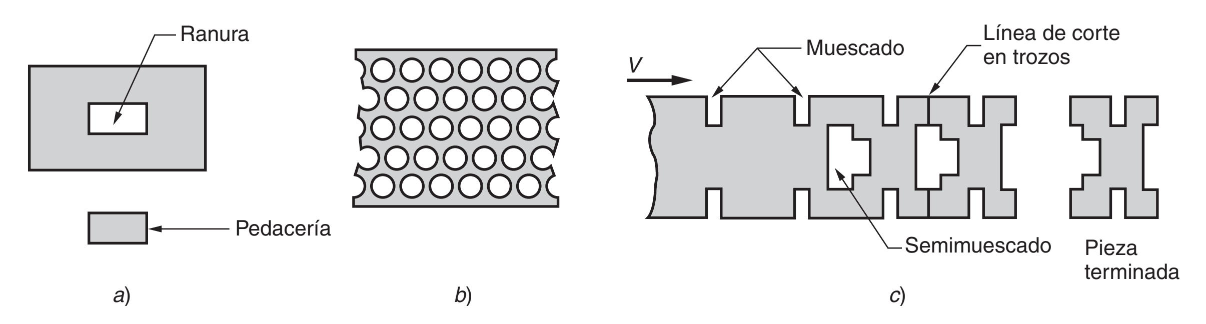


FIGURA 20.9 *a*) Ranurado, *b*) perforado múltiple, *c*) muescado y semimuescado. El símbolo *v* indica movimiento de la tira.

interior de la lámina. Estas operaciones se describen en la figura 20.9*c*). Al lector le parecerá que el semimuescado es lo mismo que la operación de perforado o ranurado. La diferencia es que el metal removido por el semimuescado crea parte del contorno de la pieza, mientras que el perforado y el ranurado genera agujeros en la forma o pieza.

Recorte, rasurado y punzonado fino El ***recorte*** es una operación de corte que se realiza en una pieza ya formada para remover el exceso de metal y fijar su tamaño. El término tiene aquí el mismo significado que en forjado (sección 19.4). Un ejemplo típico en el trabajo de láminas es el recorte de la porción superior de una copa hecha por embutido profundo para fijar la dimensión deseada.

El ***rasurado*** es una operación de corte realizada con un espacio muy pequeño destinada a obtener dimensiones precisas y bordes lisos y rectos, tal como se muestra en la figura 20.10*a*). El rasurado es una operación secundaria típica o de acabado que se aplica sobre piezas que han sido cortadas previamente.

El ***punzonado fino*** es una operación de cizallado que se usa para cortar piezas con tolerancias muy estrechas y obtener bordes rectos y lisos en un solo paso. La disposición típica para esta operación se ilustra en la figura 20.10*b*). Al principio del ciclo, una placa de presión con salientes en forma de V aplica una fuerza de sujeción F_h contra la lámina adyacente al punzón, a fin de comprimir el metal y prevenir la distorsión. El punzón desciende entonces con una velocidad más baja de lo normal y con espacios más reducidos para producir las dimensiones y los bordes de corte deseados. El proceso se reserva usualmente para espesores relativamente pequeños del material.

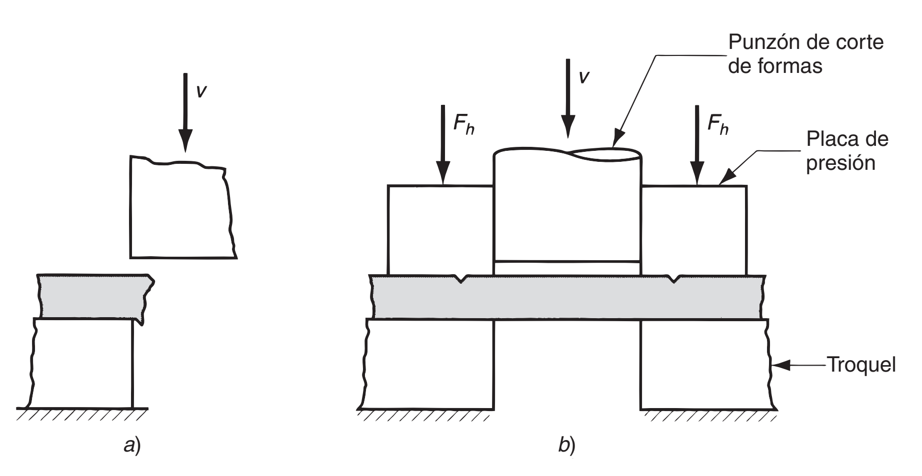


FIGURA 20.10 *a*) Rasurado y *b*) Punzonado fino. Los símbolos *v* = velocidad del punzón y F_h = fuerza de sujeción de la forma.

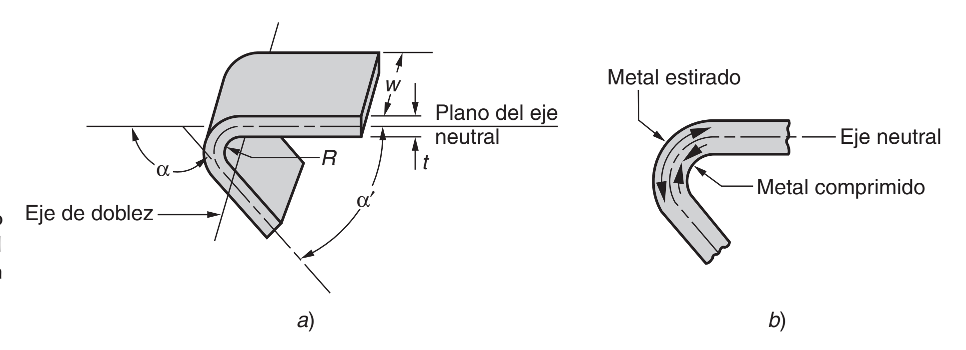


FIGURA 20.11 *a*) Doblado de lámina metálica; *b*) en el doblado ocurre elongación a la tensión y a la compresión.

20.2 OPERACIONES DE DOBLADO

En el trabajo de láminas metálicas, el ***doblado*** se define como la deformación del metal alrededor de un eje recto, como se muestra en la figura 20.11. Durante la operación de doblado, el metal dentro del plano neutral se comprime, mientras que el metal por fuera del plano neutral se estira. Estas condiciones de deformación se pueden ver en la figura 20.11*b*). El metal se deforma plásticamente, así que el doblez toma una forma permanente al remover los esfuerzos que lo causaron. El doblado produce poco o ningún cambio en el espesor de la lámina metálica.

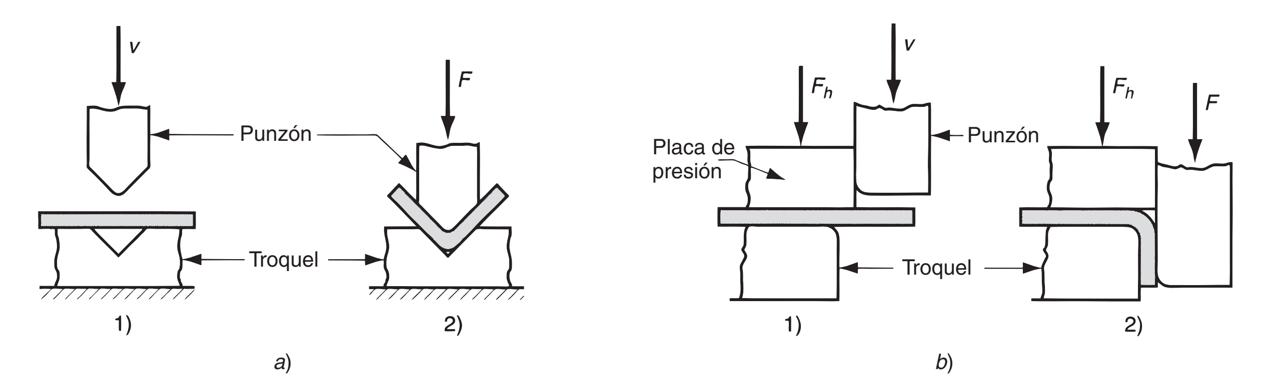
20.2.1 Doblado en V y doblado de bordes

Las operaciones de doblado se realizan usando como herramienta de trabajo diversos tipos de punzones y troqueles. Los dos métodos de doblado más comunes y sus herramientas asociadas son el doblado en V, ejecutado con un troquel en V; y el doblado de bordes, ejecutado con un troquel deslizante. Estos métodos se ilustran en la figura 20.12.

En el ***doblado en V***, la lámina de metal se dobla entre un punzón y un troquel en forma de V. Los ángulos incluidos, que fluctúan desde los muy obtusos hasta los muy agudos, se pueden hacer con troqueles en forma de V. El doblado en V se usa por lo general para operaciones de baja producción y se realiza frecuentemente en una prensa de cortina (sección 20.5.2); los correspondientes troqueles en V son relativamente simples y de bajo costo.

El ***doblado de bordes*** involucra una carga voladiza sobre la lámina de metal. Se usa una placa de presión que aplica una fuerza de sujeción F_h para sostener la base de la pieza contra el troquel, mientras el punzón fuerza la pieza volada para doblarla sobre el borde de un troquel. En un arreglo que se ilustra en la figura 20.12*b*), el doblado se limita a ángu-

FIGURA 20.12 Dos métodos comunes de doblado: *a*) doblado en V y *b*) doblado de bordes; 1) antes y 2) después del doblado. Los símbolos v = movimiento, F = fuerza de doblez aplicada, F_h = fuerza de sujeción.



los de 90º o menores. Se puede diseñar troqueles deslizantes más complicados para ángulos mayores de 90º. Debido a la placa de presión, los troqueles deslizantes son más complicados y más costosos que los troqueles en V y se usan generalmente para trabajos de alta producción.

20.2.2 Análisis de la ingeniería del doblado

Algunos términos importantes del doblado se identifican en la figura 20.11. El metal, cuyo espesor es igual a t, se dobla a través de un ángulo, llamado ángulo de doblado α. El resultado es una lámina de metal con un ángulo incluido α', tal que $\alpha + \alpha' = 180º$. El radio del doblez R se especifica normalmente en la parte interna de la pieza, en lugar de sobre el eje neutral, y se determina por el radio de la herramienta que se usa para ejecutar la operación. El doblado se hace sobre el ancho de la pieza de trabajo w.

Tolerancia de doblado Si el radio del doblado es pequeño respecto al espesor del material, el metal tiende a estirarse durante el doblado. Es importante poder estimar la magnitud del estirado que ocurre, de manera que la longitud de la pieza final pueda coincidir con la dimensión especificada. El problema es determinar la longitud del eje neutral antes del doblado, para tomar en cuenta el estirado de la sección doblada final. Esta longitud se llama ***tolerancia de doblado*** y se puede estimar como sigue:

$$A_b = 2\pi \frac{\alpha}{360}(R + K_{ba}t) \tag{20.6}$$

donde A_b = tolerancia de doblado, mm (in); α = ángulo de doblado en grados; R = radio de doblado, mm (in); t = espesor del material, mm (in); y K_{ba} es un factor para estimar el estirado. Los siguientes valores de diseño se recomiendan para K_{ba} [2]: si $R < 2t$, $K_{ba} = 0.33$; y si $R \geq 2t$, $K_{ba} = 0.50$. Estos valores de K_{ba} predicen que el estiramiento ocurre solamente si el radio de doblado es más pequeño en relación con el espesor de la lámina.

Recuperación elástica Cuando la presión de doblado se retira al terminar la operación de deformación, la energía elástica permanece en la pieza doblada haciendo que ésta recobre parcialmente su forma original. Esta recuperación se conoce como ***recuperación elástica*** y se define como el incremento del ángulo comprendido por la pieza doblada en relación con el ángulo comprendido por la herramienta formadora después de que ésta se retira. Esto se ilustra en al figura 20.13 y se expresa como:

$$SB = \frac{\alpha' - \alpha'_t}{\alpha'_t} \tag{20.7}$$

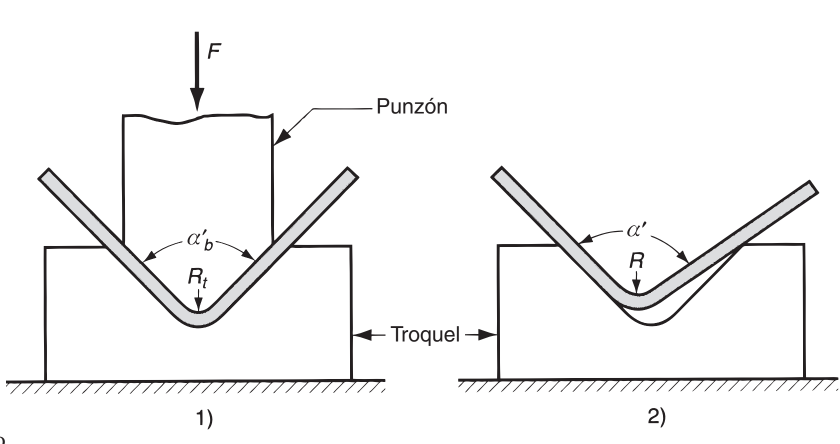


FIGURA 20.13 La recuperación elástica en el doblado se muestra como una disminución en el ángulo de doblado y un incremento del radio de doblado: 1) durante la operación, el trabajo es forzado a tomar el radio R_t y el ángulo incluido α'_t; ambos están determinados por la herramienta de doblado (punzón de doblado en V); 2) una vez que se retira el punzón, el material regresa al radio R y al ángulo incluido α'. El símbolo F = fuerza de doblado aplicada.

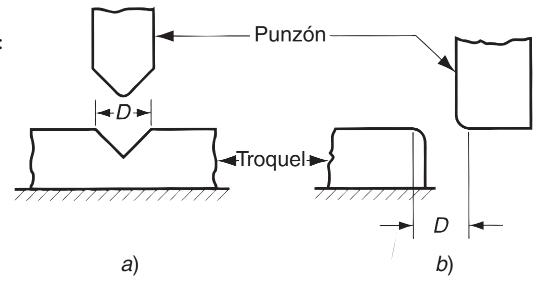


FIGURA 20.14 Dimensión de la abertura del troquel D: *a*) troquel en V, y *b*) troquel deslizante.

donde SB = recuperación elástica; α' = ángulo comprendido por la lámina de metal, en grados; y α'_t = ángulo comprendido por la herramienta de doblado en grados. Aunque no tan obvio, ocurre un incremento en el radio de doblado debido a la recuperación elástica. La magnitud de la recuperación elástica se incrementa con el módulo de elasticidad E y la resistencia de la fluencia Y del metal de trabajo.

Se puede lograr una compensación para la recuperación elástica por varios métodos. Dos métodos comunes son el sobredoblado y el fondeado. En el ***sobredoblado***, el ángulo del punzón y su radio se fabrican ligeramente menores que el ángulo especificado en la pieza final, de manera que la lámina regrese al valor deseado. El ***fondeado*** involucra comprimir la pieza al final de la carrera, deformándola plásticamente en la región de doblado.

Fuerza de doblado La fuerza que se requiere para realizar el doblado depende de la forma del punzón y del troquel, así como de la resistencia, espesor y ancho de la lámina de metal que se dobla. La fuerza máxima de doblado se puede estimar por medio de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{K_{bf} TS w t^2}{D} \tag{20.8}$$

donde F = fuerza de doblado, N (lb); TS = resistencia a la tensión del metal en lámina, MPa (lb/in^2); w = ancho de la pieza en la dirección del eje de doblez, mm (in); t = espesor del material o la pieza, mm (in); y D = dimensión del troquel abierto en mm (in), como se definió en la figura 20.14, mm (in). En mecánica, la ecuación 20.8 se basa en el doblado de una viga simple, y K_{bf} es una constante que considera las diferencias encontradas en un proceso real de doblado. Su valor depende del tipo del doblado; para doblado en V, K_{bf} = 1.33, y para doblado de bordes, K_{bf} = 0.33.

EJEMPLO 20.2 Doblado de lámina metálica

Se dobla una pieza de lámina de metal como se muestra en la figura 20.15. El metal tiene un módulo de elasticidad = 205 (10^3) MPa, resistencia a la fluencia = 275 MPa y resistencia a la tensión = 450 MPa. Determine *a*) el tamaño inicial de la pieza y *b*) la fuerza de doblado, si se usa un troquel en V con una dimensión de abertura del troquel = 25 mm.

Solución: *a*) La pieza inicial = 44.5 mm de ancho. Su longitud = 38 + A_b + 25 (mm). Como se muestra, para un ángulo incluido α' = 120º, el ángulo de doblado = 60º. En la ecuación 20.6 el valor de K_{ba} = 0.33

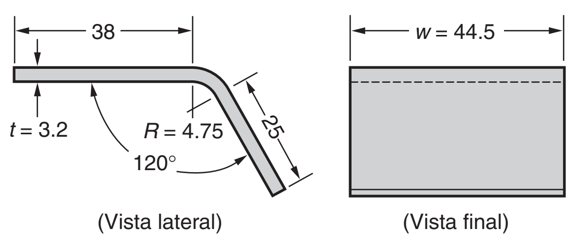


FIGURA 20.15 Pieza de hoja metálica del ejemplo 20.2 (dimensiones en mm).

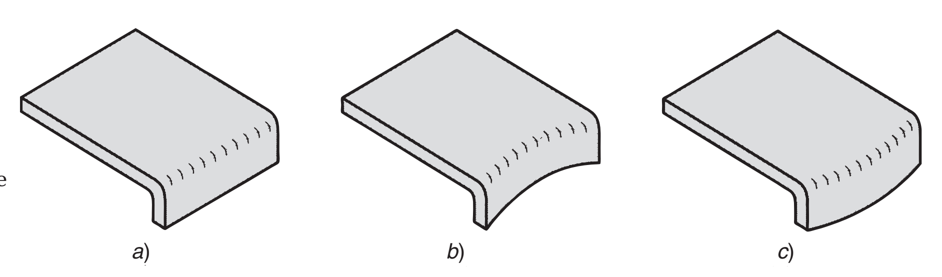


FIGURA 20.16 Formado de bridas: *a*) bridado recto, *b*) bridado estirado y *c*) bridado contraído.

ya que R/t = 4.75/3.2 = 1.48 (menor que 2.0).

$$A_b = 2\pi \frac{60}{360}(4.75 + 0.33 \times 3.2) = 6.8 \text{ mm}$$

La longitud de la pieza es entonces 38 + 6.08 + 25 = 69.08 mm.
b) La fuerza se obtiene de la ecuación 20.8, usando K_{bf} = 1.33.

$$F = \frac{1.33(450)(44.5)(3.2)^2}{2.5} = 10\,909 \text{ N}$$

20.2.3 Otras operaciones de doblado y operaciones relacionadas con el formado

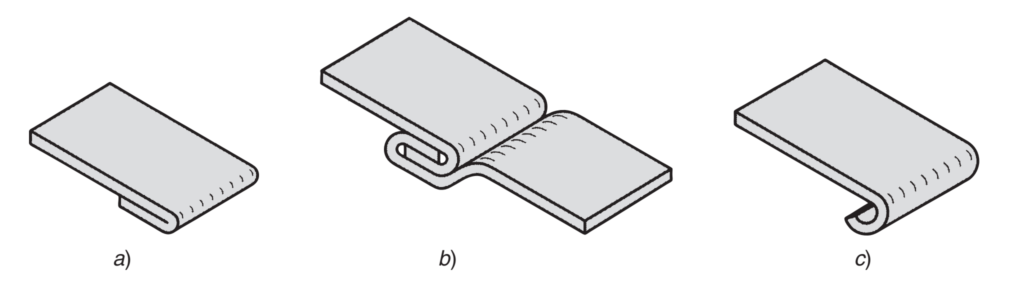
Se dispone de otras operaciones de doblado adicional, además de las de doblado en V y doblado de bordes. Algunas de éstas involucran el doblado sobre ejes curvos en lugar de ejes rectos, o tienen otras características que se diferencian de las operaciones básicas descritas anteriormente.

Formado de bridas, doblez, engargolado y rebordeado El ***formado de bridas*** es una operación en la cual el filo de la lámina de metal se doble en un ángulo de 90º para formar un borde. Se usa frecuentemente para reforzar o dar rigidez a la pieza de lámina metálica. El borde se puede formar en un doblez sobre un eje recto, como se ilustra en la figura 20.16*a*), o puede involucrar algunos estiramientos o contracciones del metal, como en los incisos *b*) y *c*).

El ***doblez*** involucra el doblado del borde de la lámina sobre sí misma en más de un paso de doblado. Esto se hace frecuentemente para eliminar el borde agudo de la pieza, a fin de incrementar la rigidez y mejorar su apariencia. El ***engargolado*** o ***empate*** es una operación relacionada en la cual se ensamblan dos bordes de láminas metálicas. El doblez y el engargolado se ilustran en la figura 20.17*a*) y *b*).

En el ***rebordeado***, también llamado ***formado de molduras***, los bordes de la pieza se producen en forma de rizo o rollo, como se muestra en la figura 20.17*c*). Tanto esta operación como el doblez se hacen con fines de seguridad, resistencia y estética. Algunos ejemplos de productos en los cuales se usa el rebordeado incluyen bisagras, ollas, sartenes y cajas para relojes de bolsillo. Estos ejemplos demuestran que el rebordeado se puede ejecutar sobre ejes rectos o curvos.

FIGURA 20.17 *a*) Doblez, *b*) engargolado (empate) y *c*) rebordeado.



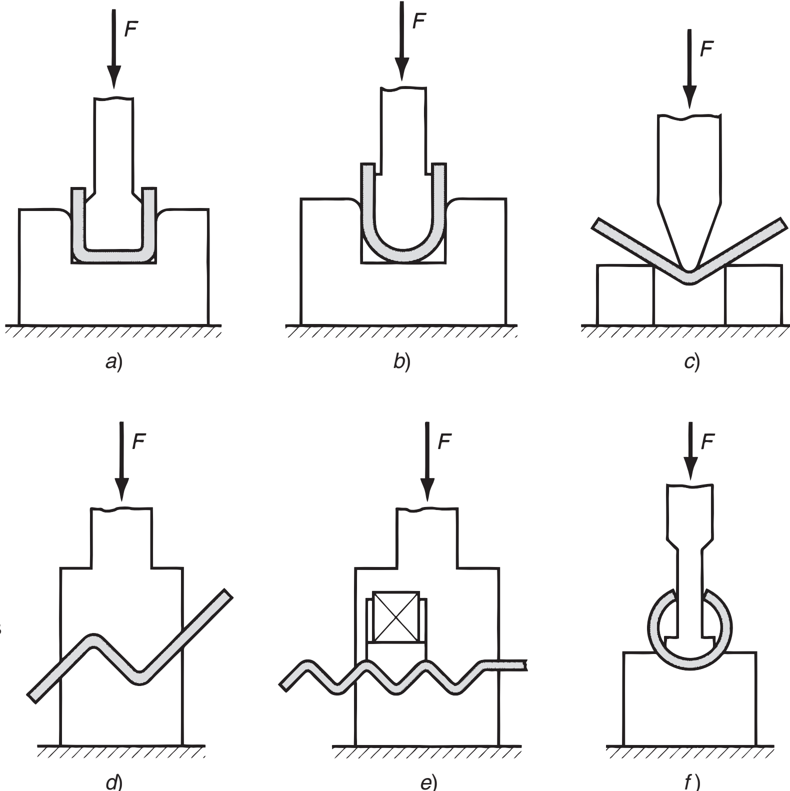


FIGURA 20.18 Operaciones misceláneas de doblado: *a*) doblado en canal, *b*) doblado en U, *c*) doblado al aire, *d*) doblado escalonado, *e*) corrugado y *f*) formado de tubo. *F* = fuerza aplicada.

Operaciones misceláneas de doblado En la figura 20.18 se muestran algunas otras operaciones de doblado para ilustrar varias formas en las que se puede doblar una lámina. La mayoría de estas operaciones se realiza en troqueles relativamente simples y similares a los troqueles en V.

20.3 EMBUTIDO

El embutido es una operación de formado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas de forma acopada, de caja y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un troquel y empujando el metal hacia la cavidad de éste con un punzón, como se muestra en la figura 20.19. La forma debe aplanarse contra el troquel por un sujetador de formas. Las piezas comunes que se hacen por embutido son latas de bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y piezas para carrocería de automóviles.

20.3.1 Mecánica del embutido

El embutido de piezas acopladas es la operación básica del embutido, con las dimensiones y los parámetros que se muestran en la figura 20.19. Se embute un disco de diámetro D_b dentro de un troquel por medio de un punzón de diámetro D_p. El punzón y el troquel deben tener un radio en las esquinas determinado por R_p y R_d. Si el punzón y el troquel tienen esquinas agudas (R_p y $R_d = 0$), se realizará una operación de perforado de un agujero en lugar de una operación de embutido. Los lados del punzón y del troquel

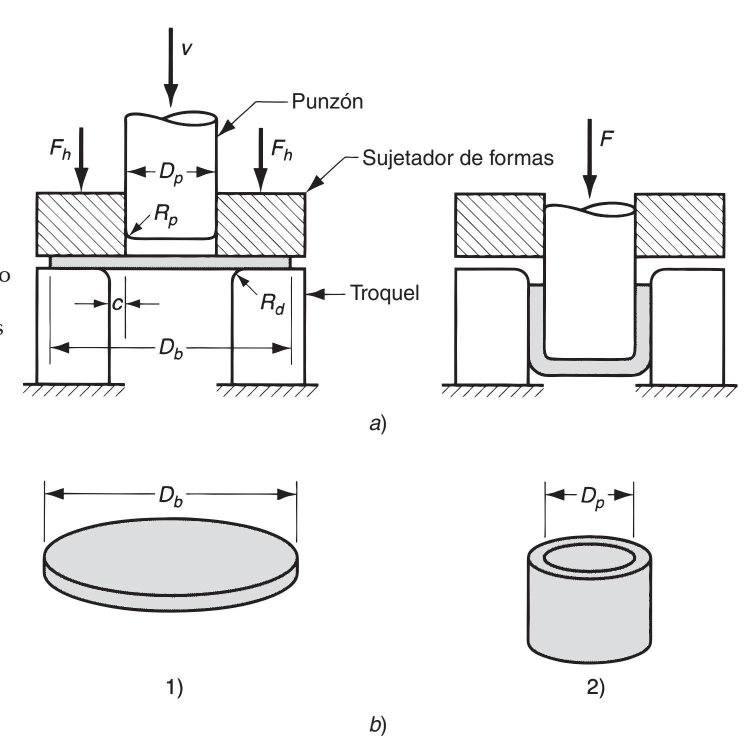


FIGURA 20.19 *a*) Embutido de una pieza acopada: 1) inicio de la operación antes de que el punzón toque el trabajo y 2) cerca del fin de la carrera; y *b*) piezas de trabajo correspondientes: 1) forma inicial y 2) pieza embutida. Los símbolos indican: c = espacio, D_b = diámetro de la forma inicial, D_p = diámetro del punzón, R_d = radio de la esquina del troquel, R_p = radio de la esquina del punzón, F = fuerza de embutido, f_h = fuerza de sujeción.

están separados por un espacio c. Éste es aproximadamente 10% mayor que el espesor del material en embutido:

$$C = 1.1\, t \tag{20.9}$$

El punzón aplica una fuerza hacia abajo F para realizar la deformación del metal, y el sujetador de piezas o de formas aplica una fuerza de sujeción hacia abajo F_h, como se muestra en el diagrama.

Conforme el punzón se recorre hacia abajo, hasta su posición final, la pieza de trabajo experimenta una serie compleja de esfuerzos y deformaciones al tomar gradualmente la forma definida por el punzón y la cavidad del troquel. Las etapas en el proceso de deformación se ilustran en la figura 20.20. Cuando el punzón empieza a empujar el trabajo, sujeta al metal a una operación de ***doblado***. La lámina es doblada simplemente sobre la esquina del punzón y la esquina del troquel, como se muestra en la figura 20.20(2). El perímetro exterior de la forma se mueve hacia el centro en esta primera etapa pero sólo ligeramente.

A medida que el punzón avanza, ocurre una acción de ***enderezado*** del metal que fue previamente doblado sobre el radio del troquel, figura 20.20(3). El metal en el fondo de la copa, así como a lo largo del radio del punzón, se ha movido hacia abajo junto con el punzón, pero el metal que se había doblado sobre el radio del troquel debe enderezarse para que pueda jalarse dentro del espacio y formar la pared del cilindro. En este punto se necesita más metal para remplazar al que ahora forma la pared del cilindro. Este nuevo metal viene del borde exterior de la forma original. El metal en la porción exterior de la forma se jala o ***embute*** hacia la apertura del troquel para sustituir al metal previamente doblado y enderezado que ahora forma la pared del cilindro. De este tipo de flujo de metal a través de un espacio restringido es de donde toma su nombre el proceso de embutido.

Durante esta etapa del proceso, la fricción y la compresión juegan papeles importantes en la brida de la pieza. Para que el material de la brida se mueva hacia la apertura del troquel, debe superar la ***fricción*** entre la lámina de metal y las superficies del sujetador y del troquel. Inicialmente se involucra la fricción estática hasta que el metal

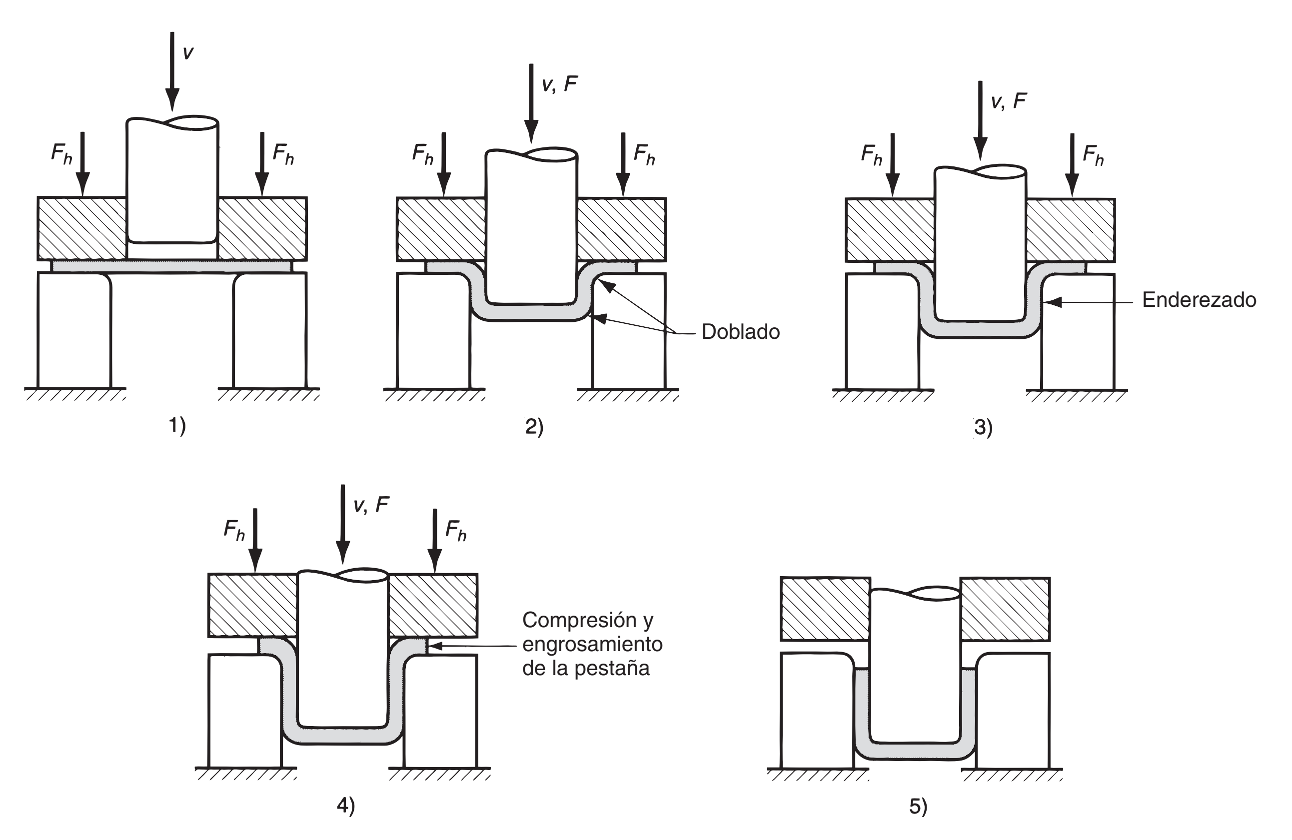


FIGURA 20.20 Etapas en la deformación del material de trabajo en el embutido profundo: 1) el punzón entra en contacto con el trabajo, 2) doblado, 3) enderezado, 4) fricción y compresión, y 5) forma final de copa, que muestra los efectos del adelgazamiento en las paredes de la copa. Los símbolos indican: v = movimiento del punzón, F = fuerza del punzón, F_h = fuerza del sujetador de formas.

empieza a moverse; cuando empieza el flujo de metal, la fricción dinámica gobierna el proceso. La magnitud de la fuerza de sujeción aplicada por el sujetador, así como las condiciones de fricción de las dos interfaces, son factores que determinan el éxito de este aspecto de la operación de embutido. Generalmente se usan lubricantes o compuestos para reducir las fuerzas de fricción durante el embutido. Además de la fricción, ocurre también la ***compresión*** en las pestañas exteriores de la forma. A medida que el metal de esta porción de la forma se estira hacia el centro, el perímetro exterior se hace menor. Debido a que el volumen del metal permanece constante, el metal se comprime y se hace más grueso al reducirse el perímetro. Esto ocasiona frecuentemente el arrugado de la brida remanente de la pieza o forma, especialmente cuando la lámina es delgada o cuando la fuerza del sujetador es demasiado baja. Esta condición no puede corregirse una vez que ha ocurrido. Los efectos de la fricción y de la compresión se ilustran en la figura 20.20(4).

La fuerza de sujeción aplicada sobre la forma se ve ahora como un factor crítico en el embutido profundo. Si ésta es muy pequeña, ocurre el arrugamiento; si es muy grande, evita que el metal fluya adecuadamente hacia la cavidad del troquel, ocasionando estiramiento y posible desgarramiento de la lámina de metal. La determinación de la fuerza adecuada de sujeción implica un delicado balance entre estos factores opuestos.

El movimiento progresivo del punzón hacia abajo ocasiona la continuación del flujo de metal, causado por el estirado y la compresión que se han descrito previamente. Ocurre además cierto ***adelgazamiento*** de las paredes del cilindro, como en la figura 20.20(5). A la fuerza que aplica el punzón se opone la del metal, en forma de deformación y fricción durante la operación. Una parte de la deformación involucra estiramiento y adelgazamiento del metal al ser jalado sobre el borde de la abertura del troquel. En una operación exitosa

de embutido puede ocurrir hasta 25% de adelgazamiento, la mayor parte cerca de la base de la copa.

20.3.2 Análisis de ingeniería del embutido

Es importante valorar las limitaciones sobre la magnitud que puede alcanzar el embutido. A menudo algunas medidas simples que pueden calcularse fácilmente para una determinada operación sirven como guía. Además, la fuerza de embutido y la fuerza de sujeción son variables importantes del proceso. Por último, debe determinarse el tamaño de la forma inicial.

Medidas de embutido Una medida de la severidad de una operación de embutido profundo es la ***relación de embutido*** DR. Ésta se define más fácilmente para una forma cilíndrica como la relación entre el diámetro de la forma inicial D_b y el diámetro del punzón D_p. En forma de ecuación,

$$DR = \frac{D_b}{D_p} \tag{20.10}$$

La relación de embutido proporciona un indicativo, aunque crudo, de la severidad de una determinada operación de embutido. A mayor relación, mayor severidad de la operación. Un límite superior aproximado de la relación de embutido es un valor de 2.0. El valor limitante real para una operación depende del radio de las esquinas en el punzón y el troquel (R_p y R_d), de las condiciones de fricción, de la profundidad de embutido y de las características de la lámina de metal (por ejemplo, ductilidad y grado de direccionalidad de las propiedades de resistencia en el metal).

Otra forma de caracterizar una operación dada de embutido es por la ***reducción*** r, donde:

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b} \tag{20.11}$$

está vinculada muy estrechamente con la relación de embutido. Consistente con el límite previo de DR ($DR \leq 2.0$), el valor de la reducción r debe ser menor que 0.50.

Una tercera medida en el embutido profundo es la ***relación de espesor al diámetro*** t/D_b (espesor de la forma inicial t dividido entre el diámetro de la forma D_b), cuyo valor en porcentaje es recomendable que sea mayor que 1%. Conforme decrece t/D_b, aumenta la tendencia al arrugamiento (sección 20.3.4).

En los casos en que el diseño de la pieza embutida exceda los límites de la relación de embutido, la reducción y la relación t/D_b, la forma debe ser embutida en dos o más pasos, algunas veces con recocido entre ellos.

EJEMPLO 20.3
Embutido acopado

Se usa una operación de embutido para formar un vaso cilíndrico con un diámetro interior de 75 mm y una altura de 50 mm. El tamaño de la forma inicial es de 138 mm y el espesor del material es de 2.4 mm. Con base en estos datos, ¿es factible la operación?

Solución: Para analizar la factibilidad, se determina la relación de embutido, la reducción y la relación espesor-diámetro.

$$DR = 138\ 75 = 1\ 84$$

$$r = (138 - 75)/138 = 0\ 4565 = 45\ 65\%$$

$$t/Db = 2\ 4\ 138 = 0\ 017 = 1\ 7\%$$

De acuerdo con estas medidas, la operación de embutido es factible. La relación de embutido es menor que 2.0, la reducción es menor de 50%, y la relación espesor-diámetro, t/D_b , es mayor a 1%. Éstos son los lineamientos generales que se usan frecuentemente para indicar la factibilidad técnica.

Fuerzas La ***fuerza de embutido*** requerida para realizar una operación dada se puede estimar aproximadamente mediante la fórmula:

$$F = \pi D_p t(TS)\left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7\right) \tag{20.12}$$

donde F = fuerza de embutido, N (lb); t = espesor original de la forma, mm (in); TS = resistencia a la tensión, MPa (lb/in^2); y D_b y D_p son los diámetros de la forma inicial y del punzón, respectivamente, en mm (in). La constante 0.7 es un factor de corrección para la fricción. La ecuación 20.12 estima la fuerza máxima en la operación. La fuerza de embutido varía a través del movimiento hacia abajo del punzón, alcanzando usualmente su valor máximo a una tercera parte de la longitud de la carrera.

La ***fuerza de sujeción*** es un factor importante en la operación de embutido. Como una primera aproximación, la presión de sujeción se puede fijar en un valor de 0.015 de la resistencia a la fluencia de la lámina de metal [7]. Este valor se multiplica por la porción del área de la forma inicial que será sostenida por el sujetador. En forma de ecuación,

$$F_h = 0.015\,\{D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2\} \tag{20.13}$$

donde F_h = fuerza de sujeción en embutido, N (lb); Y = resistencia a la fluencia de la lámina de metal, MPa (lb/in^2); t = espesor inicial del material, mm (in); R_d = radio de la esquina del troquel, mm (in); los demás términos se definieron antes. La fuerza de sujeción es de manera usual una tercera parte, aproximadamente, de la fuerza o embutido [8].

EJEMPLO 20.4 Fuerzas en el embutido

Para la operación de embutido del ejemplo 20.3, determine *a*) fuerza de embutido y *b*) fuerza de sujeción, dado que la resistencia a la tensión de la lámina de metal (acero al bajo carbono) = 300 MPa y la resistencia a la fluencia = 175 MPa. El radio de la esquina del troquel = 6 mm.

Solución: *a*) La fuerza máxima de embutido está determinada por la ecuación 20.12:

$$F = \pi(75)(2.4)(300)\left(\frac{138}{75} - 0.7\right) = 193\ 396\ \text{N}$$

b) la fuerza de sujeción se estima mediante la ecuación (20.13):

$$F_h = 0.015(175)\pi(138^2 - (75 + 2.2 \times 2.4 + 2 \times 6)^2) = 86.824\ \text{N}$$

■

Determinación del tamaño de la forma Para lograr una dimensión satisfactoria de una pieza embutida cilíndrica, se necesita el diámetro correcto de la forma inicial. Ésta debe ser lo suficientemente grande para suministrar el metal necesario que complete la pieza. Si hay demasiado material, habrá desperdicio innecesario. Para formas no cilíndricas, existe el mismo problema para estimar el tamaño de la forma inicial, sólo que ésta no será redonda.

A continuación se describe un método razonable para estimar el diámetro de la forma inicial en una operación de embutido profundo en la que se produce una pieza redonda (por ejemplo, vasos cilíndricos y formas más complejas grandes con simetría axial). Como el volumen del producto final es el mismo que el de la pieza metálica inicial, el diámetro de la forma inicial puede calcularse si se establece que el volumen inicial de la forma es

igual al volumen final del producto, y se despeja el diámetro D_b. Para facilitar los cálculos, generalmente se supone que el adelgazamiento de las paredes es nulo.

20.3.3 Otras operaciones de embutido

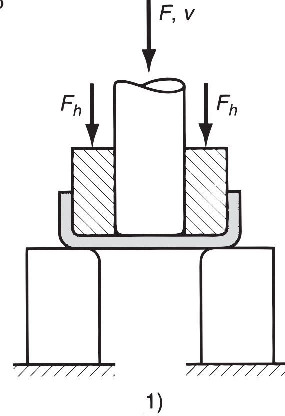
El estudio se ha enfocado en una operación convencional de embutido acopado que produce una forma cilíndrica simple en un solo paso y usa un sujetador para facilitar el proceso. Se analizan algunas variantes de esta operación básica.

Reembutido Si el cambio de forma que requiere el diseño de la pieza es demasiado severo (la relación de embutido es demasiado alta), el formado completo de la pieza puede requerir más de un paso de embutido. Al segundo paso de embutido y a cualquier otro posterior, si se necesita, se le llama ***reembutido***. En la figura 20.21 se ilustra una operación de reembutido.

Cuando el diseño de la pieza requiere una relación de embutido demasiado grande que impida formar la pieza en un solo paso, se puede ejecutar la siguiente sugerencia general para la reducción, que se puede hacer en cada operación de embutido [8]: para el primer embutido, la reducción máxima de la forma inicial debe ser de 40 a 45%; para el segundo embutido (primer reembutido), la reducción máxima debe ser 30%; para el tercer embutido (segundo reembutido), la reducción máxima debe ser 16%.

Una operación relacionada es el ***embutido inverso***, en el cual se coloca una pieza embutida hacia abajo en el troquel y una segunda operación de embutido produce una configuración como la que se muestra en la figura 20.22. Aunque puede parecer que el embutido inverso podría producir una deformación más severa que el reembutido, en realidad es más fácil en el metal. La razón es que en el embutido inverso la lámina de metal se dobla en la misma dirección en las esquinas exteriores e interiores del troquel, mientras que en el reembutido el metal se dobla en direcciones opuestas en las dos esquinas. Debido a esta diferencia, el metal experimenta menos endurecimiento por deformación en el embutido inverso y, por tanto, la fuerza del embutido es menor.

Embutido de formas no cilíndricas Muchos productos requieren el embutido de formas no cilíndricas. La variedad de formas embutidas incluyen formas cuadradas, cajas rectangulares (lavabos), copas escalonadas, conos, copas con bases esféricas más que planas y formas curvas irregulares (como ocurre en los paneles de las carrocerías de automóviles). Cada una de estas formas representa un problema técnico único en embutido. Para el lector que se interese, Eary suministra una revisión detallada del embutido para esta clase de formas [1].



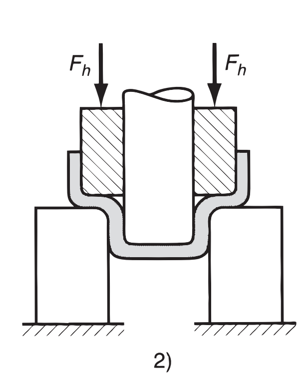


FIGURA 20.21 Reembutido de una copa: 1) inicio del reembutido y 2) final de la carrera. Los símbolos indican: v = velocidad del punzón, F = fuerza aplicada por el punzón, F_h = fuerza del sujetador de formas.

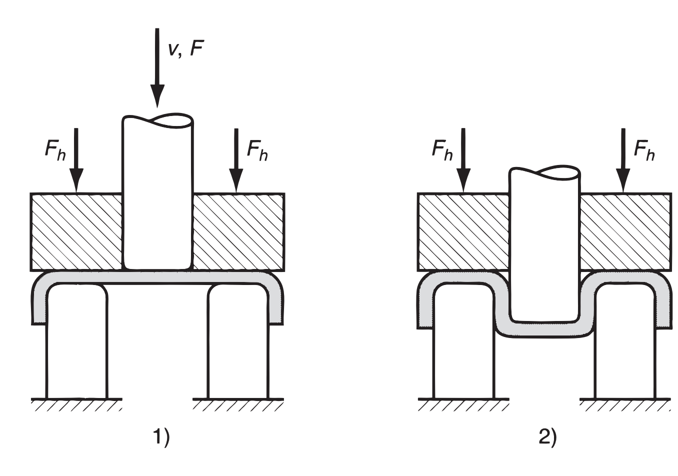


FIGURA 20.22 Embutido inverso: 1) inicio y 2) terminación. Símbolos v = velocidad del punzón, F = fuerza aplicada por el punzón, F_h = fuerza del sujetador de formas.

Embutido sin sujetador Una de las funciones principales del sujetador consiste en prevenir el arrugado de la brida mientras se embute la pieza. La tendencia al arrugamiento se reduce al aumentar la relación entre el espesor y el diámetro de la forma inicial. Si la relación t/D_b es lo suficientemente grande, se puede alcanzar el embutido sin necesidad de un sujetador, como se muestra en la figura 20.23. Puede estimarse la condición limitante para el embutido sin sujetador mediante la siguiente expresión [4]:

$$D_b - D_p < 5_t \tag{20.14}$$

El troquel de embutido debe tener forma de embudo o cono para permitir que el material a embutir se ajuste a la cavidad del troquel. La ventaja del embutido sin un sujetador, cuando éste es posible, es un costo más bajo de las herramientas y el uso de una prensa más simple, porque se evita la necesidad de un control separado de los movimientos del sujetador y del punzón.

20.3.4 Defectos del embutido

El embutido de lámina metálica es una operación más compleja que el corte o el doblado; por tanto, hay más cosas que pueden fallar. Pueden presentarse numerosos defectos en un producto embutido; anteriormente se citaron algunos de ellos. La siguiente es una lista de los defectos que se muestran en la figura 20.24:

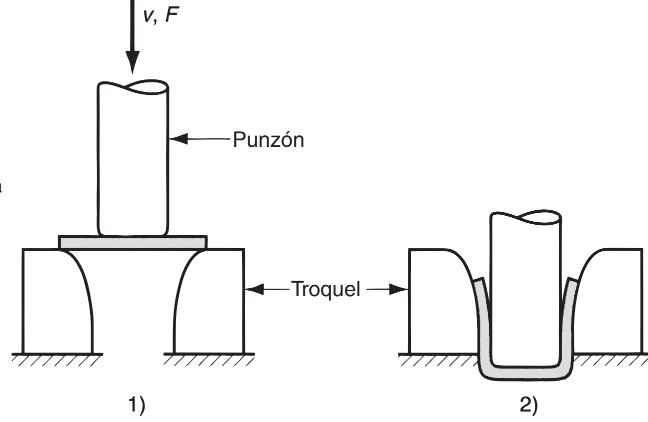


FIGURA 20.23 Embutidos sin sujetador: 1) inicio del proceso y 2) fin de la carrera. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.

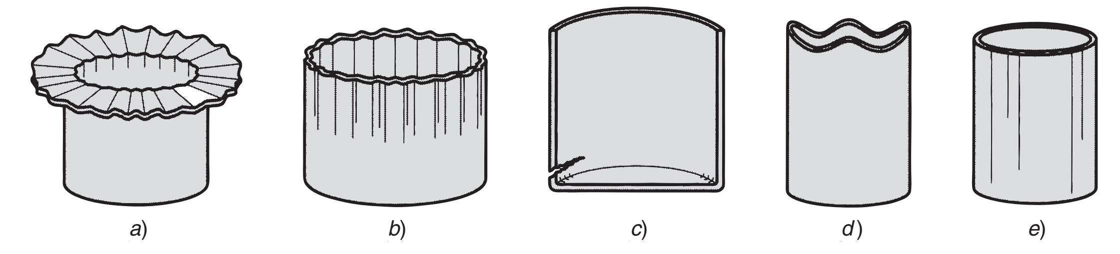


FIGURA 20.24 Defectos comunes en las piezas embutidas *a*) el arrugamiento puede ocurrir en la pestaña o *b*) en la pared, *c*) desgarramiento, *d*) orejeado y *e*) rayados superficiales.

a) ***Arrugamiento en la brida o pestaña***. El arrugamiento en una pieza embutida consiste en una serie de pliegues que se forman radialmente en la brida no embutida de la pieza de trabajo, debido al pandeo por compresión.
b) ***Arrugamiento en la pared***. Si la brida arrugada se embute en el cilindro, estos pliegues aparecen en la pared vertical del cilindro.
c) ***Desgarramiento***. Este defecto consiste en una grieta que se abre en la pared vertical, usualmente cerca de la base de la copa embutida, debido a altos esfuerzos a la tensión que causan adelgazamiento y rotura del metal en esta región. Este tipo de falla puede también ocurrir cuando el metal se estira sobre una esquina afilada del troquel.
d) ***Orejeado***. Ésta es la formación de irregularidades (llamadas ***orejas***) en el borde superior de la pieza embutida, causada por anisotropía en la lámina de metal. Si el material es perfectamente isotrópico no se forman las orejas.
e) ***Rayados superficiales***. Pueden ocurrir rayaduras en la superficie de la pieza embutida si el punzón y el troquel no son lisos o si la lubricación es insuficiente.

20.4 OTRAS OPERACIONES DE FORMADO DE LÁMINAS METÁLICAS

En las prensas convencionales se realizan, además del doblado y el embutido, otras operaciones de formado. Aquí se clasifican como 1) operaciones realizadas con herramientas metálicas y 2) operaciones ejecutadas con herramientas flexibles de caucho.

20.4.1 Operaciones realizadas con herramientas metálicas.

Las operaciones realizadas con herramientas metálicas incluyen: 1) planchado, 2) acuñado y estampado, 3) desplegado y 4) torcido.

Planchado En el embutido profundo se comprime la pestaña por una acción de compresión del perímetro de la forma inicial que busca una circunferencia menor conforme es embutida hacia la abertura del troquel. Debido a esta compresión, la lámina de metal cerca del borde exterior de la forma inicial se va engrosando conforme se mueve hacia adentro. Si el espesor de este material es más grande que el espacio entre punzón y el troquel, será comprimido al tamaño del espacio, un proceso conocido como ***planchado***.

El planchado se realiza algunas veces como un paso independiente que sigue al embutido. Este caso se ilustra en la figura 20.25. El planchado hace que las paredes de la pieza cilíndrica sean más uniformes en su espesor. La pieza embutida es por tanto más larga y el uso del material es más eficiente. Las latas para bebidas y los casquillos de artillería, artículos de alta producción, incluyen el planchado en sus procesos para lograr economías en el uso de material.

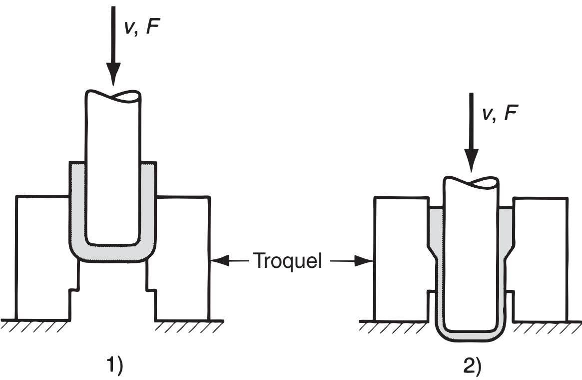


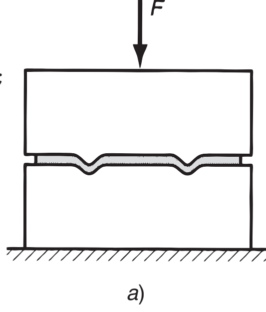
FIGURA 20.25 Planchado para obtener un espesor más uniforme de la pared en una pieza embutida: 1) inicio del proceso y 2) durante el proceso. Note el adelgazamiento y elongación de las paredes. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.

Acuñado y estampado El acuñado es una operación de deformación volumétrica que se analizó en el capítulo anterior; se usa con mucha frecuencia en el trabajo de láminas metálicas para formar indentaciones y secciones levantadas de la pieza. La indentación produce adelgazamiento de la lámina metálica y las elevaciones de las secciones producen engrosamiento del metal.

El ***estampado*** es una operación de formado que se usa para crear indentaciones en la lámina, como letras o costillas de refuerzo que se describen en la figura 20.26. Se involucran algunos estiramientos y adelgazamientos del metal. Esta operación puede parecer similar al acuñado. Sin embargo, los troqueles de estampado poseen contornos y cavidades que coinciden, el punzón contiene los contornos positivos y el troquel los negativos, mientras que los troqueles de grabado pueden tener cavidades diferentes en las dos mitades del troquel; por este motivo las deformaciones son más significativas que en el estampado.

Desplegado El desplegado es una combinación de corte y doblado, o corte y formado, en un solo paso para separar parcialmente el metal de la lámina. En la figura 20.27 se muestran varios ejemplos. Entre otras aplicaciones, el desplegado se usa para hacer rejillas en las piezas de metal para ventilar el calor del interior de los gabinetes eléctricos.

Torcido En la operación de ***torcido***, la lámina se sujeta a una carga de torsión más que a una carga de doblado, causando así una torcedura sobre la longitud de la lámina. Este tipo de operación tiene aplicaciones limitadas; se usa para hacer productos tales como ventiladores y paletas propulsoras. Se puede realizar en una prensa convencional con punzón y troquel que han sido diseñados para formar la pieza en la forma torcida requerida.



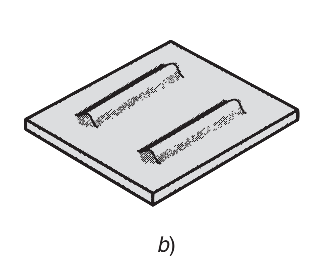


FIGURA 20.26 Estampado: *a*) sección transversal de la configuración del troquel y punzón durante el prensado; *b*) pieza terminada con bordes estampados.

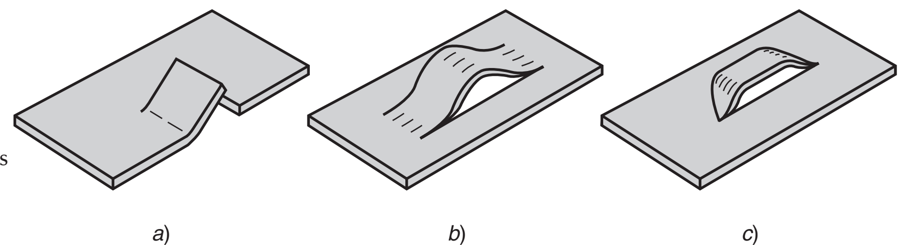


FIGURA 20.27 Varias formas de desplegado: *a*) corte y doblez; *b*) y *c*) dos tipos de corte y formado.

20.4.2 Procesos de formado con caucho

Las dos operaciones analizadas en esta sección se realizan en prensas convencionales, pero las herramientas son inusuales porque usan un elemento flexible (hecho de caucho o material similar) para efectuar la operación de formado. Las operaciones son: 1) el proceso Guerin y 2) el hidroformado.

Proceso Guerin El ***proceso Guerin*** usa un cojín de caucho grueso (u otro material flexible) para formar la lámina de metal sobre un bloque de forma positiva como se muestra en la figura 20.28. El cojín de caucho está confinado en un recipiente de acero. Al descender el punzón, el caucho rodea gradualmente la lámina, aplicando presión para deformarla y forzarla a tomar la forma del bloque. Este proceso se limita a formas poco profundas relativamente, ya que las presiones generadas por el caucho, de hasta 10 MPa (1 500 lb/in^2), no son suficientes para evitar el arrugado de formas más profundas.

La ventaja del proceso Guerin es el relativo bajo costo de las herramientas. El bloque de horma puede ser hecho de madera, plástico u otro material que sea fácil de formar y el cojín de caucho puede usarse con diferentes formas de bloques. Estos factores hacen atractivo el proceso de formado con caucho en cantidades pequeñas de producción como las de la industria aérea, donde se creó el proceso.

Hidroformado El ***hidroformado*** es similar al proceso Guerin. La diferencia es que se sustituye el cojín grueso de caucho por un diafragma de caucho lleno con un fluido hidráulico, como se ilustra en la figura 20.29. Esto permite aumentar la presión que forma la parte de trabajo, hasta cerca de 100 MPa (15 000 lb/in^2), previniendo así el arrugado en piezas profundas. De

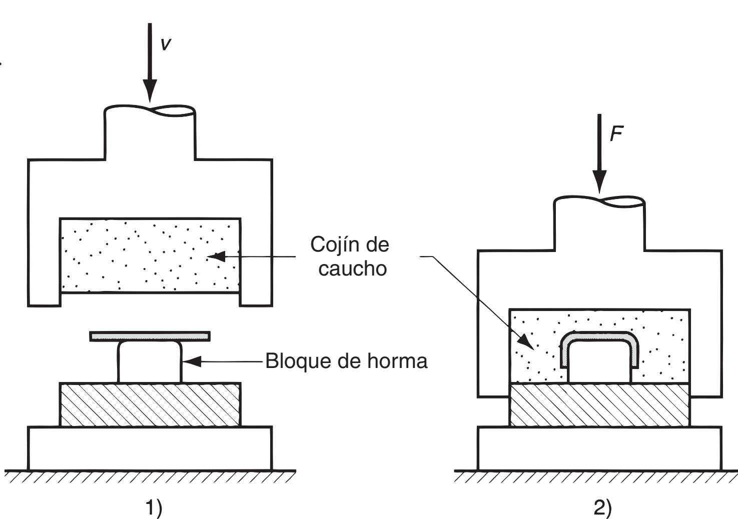


FIGURA 20.28 Proceso Guerin: 1) antes y 2) después. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.

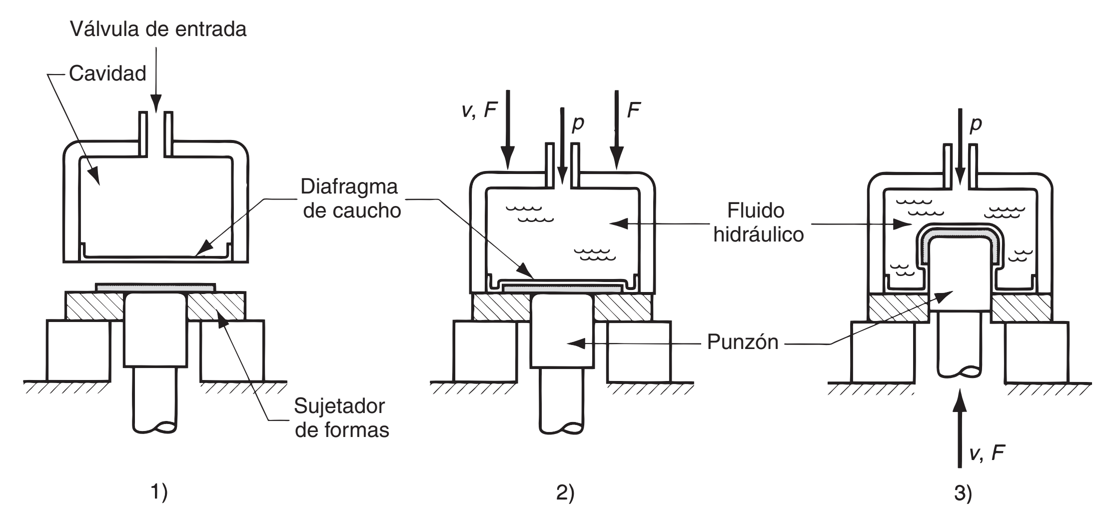


FIGURA 20.29 Proceso de hidroformado 1) inicio, no hay fluido en la cavidad; 2) prensa cerrada, cavidad con fluido a presión; 3) el punzón presiona sobre el trabajo para formar la pieza. Los símbolos indican v = velocidad, F = fuerza aplicada y p = presión hidráulica.

hecho, se puede lograr embutidos más profundos con procesos de hidroformado que con el embutido profundo convencional. Esto se debe a que la presión uniforme del hidroformado fuerza la lámina contra el punzón a todo lo largo, aumentando la fricción y reduciendo los esfuerzos a la tensión que causan el desgarre en la base de la copa embutida.

20.5 TROQUELES Y PRENSAS PARA PROCESOS CON LÁMINAS METÁLICAS

En esta sección se examina el punzón y el troquel, así como el equipo de producción que se usa como herramienta en las operaciones convencionales de procesamiento de láminas metálicas.

20.5.1 Troqueles

Casi todas las operaciones de trabajo en prensas que se describen antes se ejecutan con punzones y troqueles convencionales. La herramienta aquí referida de manera específica es un ***troquel***. Una herramienta diseñada a la medida de la pieza que se produce. Se usa frecuentemente el término ***troquel de estampado*** (o troquelador) para los troqueles de alta producción.

Componentes de un troquel de estampado En el diagrama de la figura 20.30 se ilustran los componentes de un troquel de estampado que ejecuta una operación simple de corte de formas. Los componentes de trabajo son el punzón y el troquel. El ***punzón*** y el ***troquel*** se fijan a las porciones superior e inferior del ***conjunto troquelador***, llamados respectivamente el ***portapunzón*** (o ***zapata superior***) y el ***portamatriz*** (***zapata inferior***). El conjunto incluye también barras guía y bujes para asegurar el alineamiento apropiado entre el punzón y el troquel durante la operación. El portamatriz se fija a la base de la prensa y el portapunzón se fija al pisón. El movimiento del pisón ejecuta la operación de prensado.

Además de estos componentes, un troquel para corte de formas o punzonado debe incluir un medio para evitar que se peguen las láminas al punzón cuando éste regresa hacia arriba, después de la operación. El agujero que se genera en el material es del mismo tamaño que el punzón y tiende a pegarse a éste antes de su retiro. El dispositivo del troquel

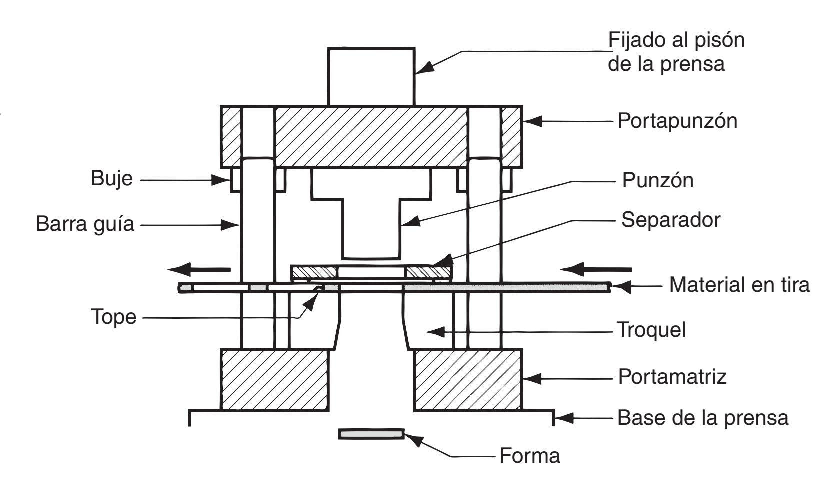


FIGURA 20.30 Componentes de un punzón y un troquel para una operación de corte de formas.

que separa la lámina del punzón se llama ***separador***, el cual consiste frecuentemente en una simple placa fijada al troquel con un agujero ligeramente más grande que el diámetro del punzón.

Para troqueles que procesan tiras o rollos de lámina metálica, se requiere un dispositivo que detenga el avance de la lámina que se alimenta al troquel entre cada ciclo de prensado. El dispositivo se llama (trate de adivinar) ***tope***. Los topes van desde simples pernos localizados en la trayectoria de la tira para bloquear su avance hasta complejos mecanismos sincronizados que se levantan y retraen con cada acción de la prensa. En la citada figura se muestra el tope más simple.

Hay otros componentes de los troqueles para prensado; la descripción precedente sólo proporciona una introducción a la terminología.

Tipos de troqueles de estampado Aparte de las diferencias entre los troqueles de estampado de corte, doblado y embutido, hay otras que se refieren al número de operaciones separadas que se ejecutan en cada acción de la prensa y a cómo se realizan dichas operaciones.

El tipo de troquel considerado aquí ejecuta una sola operación con cada golpe de la prensa y se llama ***troquel simple***. Otro troquel que ejecuta operaciones simples es el troquel en V (sección 20.2.1). En el trabajo con prensas hay troqueles más complicados, como troqueles compuestos, combinados y progresivos. Un ***troquel compuesto*** realiza dos operaciones en una sola estación, tales como corte de formas y punzonado, o corte de formas y embutido [1]. Un ***troquel combinado*** es menos común: ejecuta dos operaciones en dos diferentes posiciones. Algunos ejemplos de aplicaciones en este troquel incluyen corte de formas para dos diferentes piezas (por ejemplo, derecha e izquierda) o corte de formas y después doblado de la misma pieza [1].

Un ***troquel progresivo*** ejecuta dos o más operaciones sobre una lámina de metal en dos o más posiciones con cada golpe de prensa. La pieza se fabrica progresivamente. El rollo de lámina se alimenta de una posición a la siguiente y en cada una de estas estaciones se ejecutan las diferentes operaciones (por ejemplo, punzonado, muescado, doblado y perforado). La pieza sale de la última posición completa y separada (cortada) del rollo remanente. El diseño de un troquel progresivo empieza con la disposición de la pieza sobre la tira o rollo y la determinación de las operaciones que se van a ejecutar en cada estación. El resultado de este procedimiento se llama ***desarrollo de tira***. En la figura 20.31 se ilustra un troquel progresivo y el desarrollo de tira asociado. Los troqueles progresivos pueden tener una docena o más estaciones. Los troqueles de estampado son más complicados y costosos, pero se justifican económicamente para piezas complejas que requieren operaciones múltiples a altas velocidades de producción.

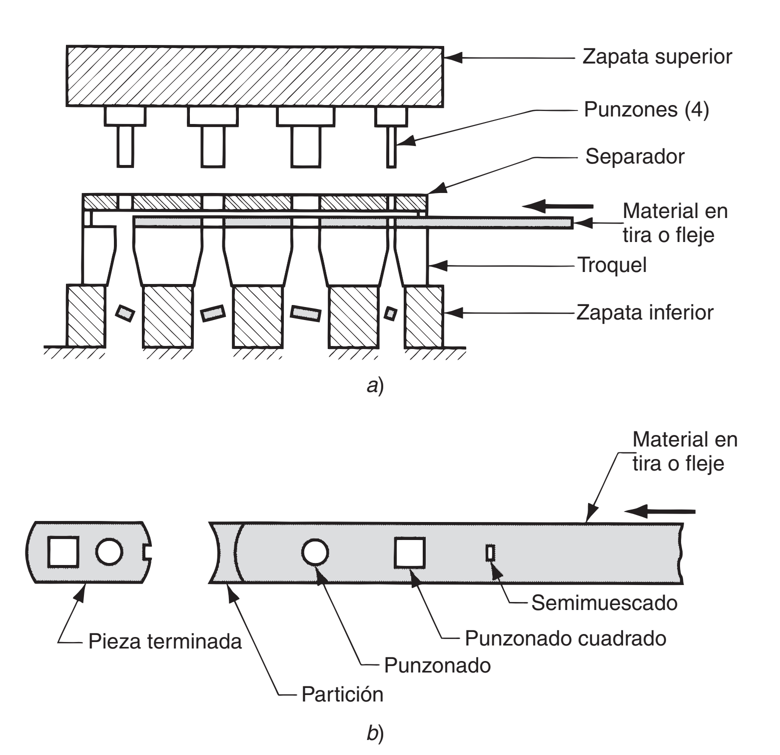


FIGURA 20.31 *a*) Troquel progresivo y *b*) desarrollo asociado de la tira.

20.5.2 Prensas

Las ***prensas*** que se usan para el trabajo de láminas metálicas son máquinas herramienta que tienen una ***cama*** estacionaria y un ***pisón*** (o ***corredera***), el cual puede ser accionado hacia la cama y en dirección contraria para ejecutar varias operaciones de corte y formado. En la figura 20.32 se muestra una prensa típica con sus principales componentes. El ***armazón*** establece las posiciones relativas de la cama y el pisón, el cual es accionado mediante fuerza mecánica o hidráulica. Cuando se monta un troquel en la prensa, el portapunzón se fija al pisón y el portamatriz se fija a la ***placa transversal*** de la cama de la prensa.

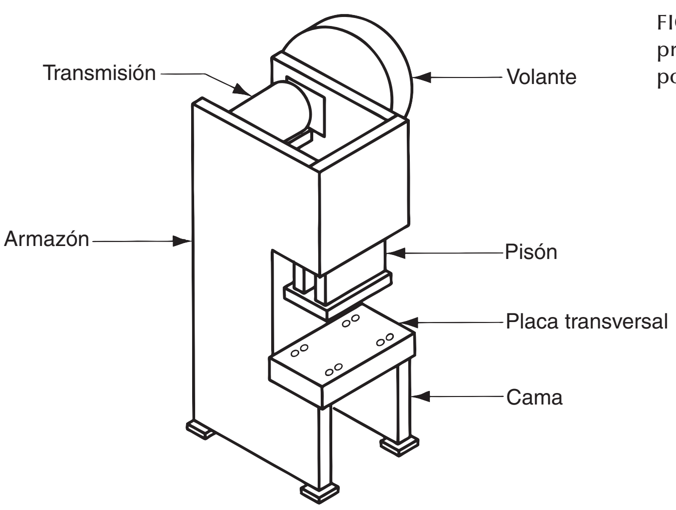


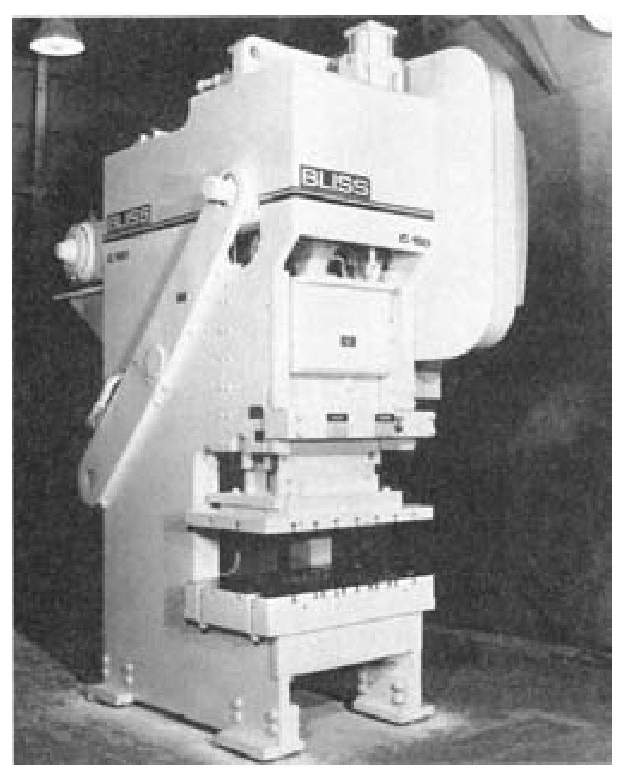
FIGURA 20.32 Componentes de una prensa troqueladora típica accionada por transmisión mecánica.

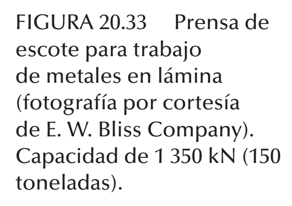
Hay prensas de varias capacidades, sistemas de potencia y tipos de armazón. La capacidad de una prensa es su disposición para manejar la fuerza y energía requerida para realizar las operaciones de troquelado. Ésta se determina por su tamaño físico y por sus sistemas de potencia. El sistema de potencia se refiere a la clase de fuerza que usa, ya sea mecánica o hidráulica, así como al tipo de transmisión empleada para enviar la potencia al pisón. La velocidad de producción es otro aspecto importante de la capacidad. El tipo de armazón de la prensa se refiere a la construcción física de la misma. Hay dos tipos de armazón o estructura de uso común: de escote o de estructura en C y estructura de lados rectos.

Prensas de escote Su estructura tiene la configuración general de la letra C y por ello frecuentemente se conoce como estructura o ***armazón en C.*** Las prensas de escote proporcionan buen acceso al troquel, y generalmente pueden abrirse por la parte trasera para permitir la eyección conveniente de los troquelados o de la pedacería. Los tipos principales de prensas de escote son: *a*) de escote sólido, *b*) cama ajustable, *c*) inclinable con abertura posterior, *d*) prensa plegadora y *e*) prensa de torreta.

El ***escote sólido*** (algunas veces llamado simplemente ***prensa C***) tiene una construcción de una sola pieza, como se muestra en la figura 20.32. Las prensas con esta estructura son rígidas; no obstante, la forma en C permite un acceso conveniente de los troqueles para alimentar tiras o rollos de material. Dichas prensas están disponibles en una escala de tamaños con capacidades cercanas a 9 000 kN (1 000 toneladas). Los moldes que se muestran en la figura 20.33 tienen una capacidad de 1350 kN (150 tons). Las ***prensas con armazón de cama ajustable*** son una variante de la estructura en C, en la cual una cama ajustable se añade para acomodar varios tamaños de troqueles. Este ajuste hace que se sacrifique la capacidad del tonelaje. La ***prensa inclinable con abertura*** posterior tiene una estructura en C ensamblada a la base, de tal manera que el armazón pueda inclinarse hacia atrás en varios ángulos para dejar caer, mediante la fuerza de gravedad, los troquelados por la abertura trasera. Las capacidades de tales prensas fluctúan entre 1 tonelada y alrededor de 2 250 kN (250 toneladas). Pueden operarse a altas velocidades hasta cerca de mil golpes por minuto.

La ***prensa plegadora*** es una prensa con estructura en C que tiene una cama muy amplia. El modelo en la figura 20.34 tiene un ancho de cama de 9.15 m (30 ft). Esto per-




FIGURA 20.33 Prensa de escote para trabajo de metales en lámina (fotografía por cortesía de E. W. Bliss Company). Capacidad de 1 350 kN (150 toneladas).

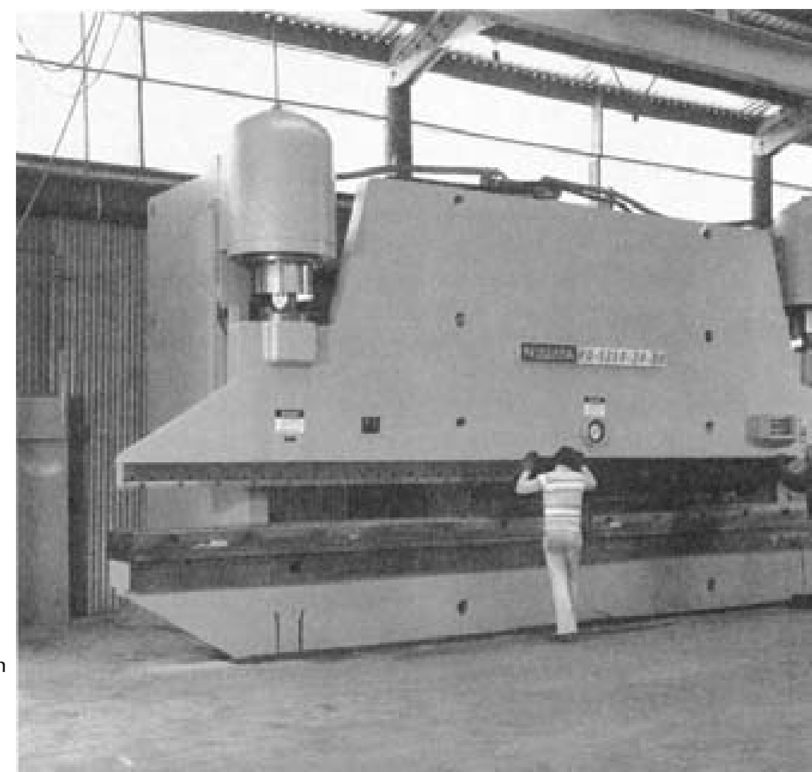


FIGURA 20.34 Prensa plegadora con un ancho de cama de 9.15 m (30 ft) y capacidad de 11 200 kN (1 250 tons); se muestra a dos trabajadores que posicionan una placa para doblar (fotografía por cortesía de Niagara Machine & Tools Works).

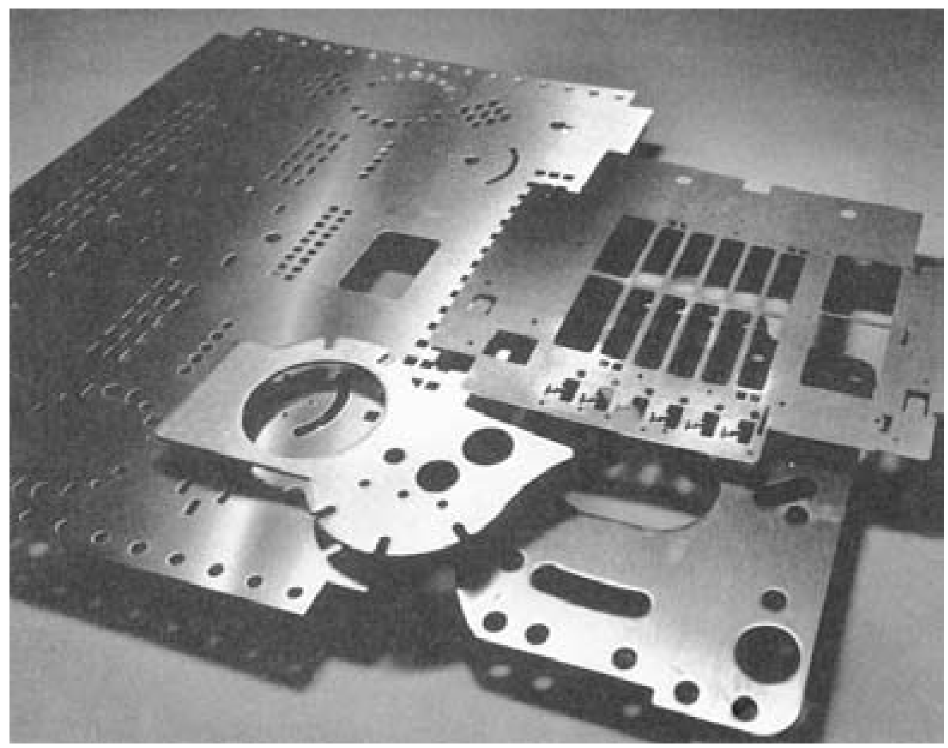


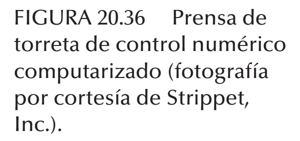
FIGURA 20.35 Varias piezas de lámina producidas en una prensa de torreta; en ellas se muestra la variedad de formas posibles de agujeros (fotografía cortesía de Strippet, Inc.).

mite acomodar en la cama un número de troqueles separados (típicos troqueles en V), de manera que se puedan hacer económicamente pequeñas cantidades de troquelados. Sin embargo, dichas cantidades en algunas ocasiones requieren doblados múltiples a diferentes ángulos, y muchas veces se necesita la operación manual. Para una pieza que requiere una serie de dobleces, el operador mueve la forma inicial a través de los dobleces deseados en secuencia, y la prensa actúa en cada troquel para completar el trabajo necesario.

Mientras las prensas plegadoras se adaptan bien a las operaciones de doblado, las ***prensas de torreta*** se adaptan a situaciones en las cuales se realizan punzonados, rasurados y muescados, así como a otras operaciones de corte que se muestran en la figura 20.35. Las prensas de torreta tienen un armazón en C, aunque esta construcción no es tan obvia en la figura 20.36. El punzón convencional se remplaza por una torreta que contiene muchos punzones de diferentes tamaños y formas. La torreta trabaja por selección (rotación) de la posición que mantiene el punzón para ejecutar la operación requerida. Además de la torreta del punzón, hay una torreta correspondiente del troquel que pone en posición las aberturas del troquel para cada punzón. Entre el punzón y el troquel está la forma de lámina de metal, sostenida por un sistema posicionador x-y que opera por control numérico computarizado (sección 38.1). La forma se mueve a la posición coordinada que se requiere para cada operación de corte.

Prensas con armazón de lados rectos Para trabajos que requieren alto tonelaje, se necesitan armazones de prensa con una rigidez estructural mayor. Las prensas de lados rectos tienen lados completos que le dan una apariencia de caja, como en la figura 20.37. Esta construcción aumenta la resistencia y rigidez del armazón. Como resultado, en estas prensas se dispone de capacidades hasta de 35 000 kN (4 000 toneladas) para trabajo en lámina. En forja se usan grandes prensas de este tipo de armazón (sección 19.3).

En todas estas prensas de estructura en C y armazón de lados rectos, el tamaño se relaciona estrechamente con la capacidad de tonelaje. Las prensas más grandes se construyen para soportar fuerzas más altas en el trabajo de prensado. El tamaño de las prensas se relaciona también con la velocidad a la que pueden operar. Las prensas más pequeñas tienen generalmente velocidades de producción más altas que las prensas grandes.


FIGURA 20.36 Prensa de torreta de control numérico computarizado (fotografía por cortesía de Strippet, Inc.).

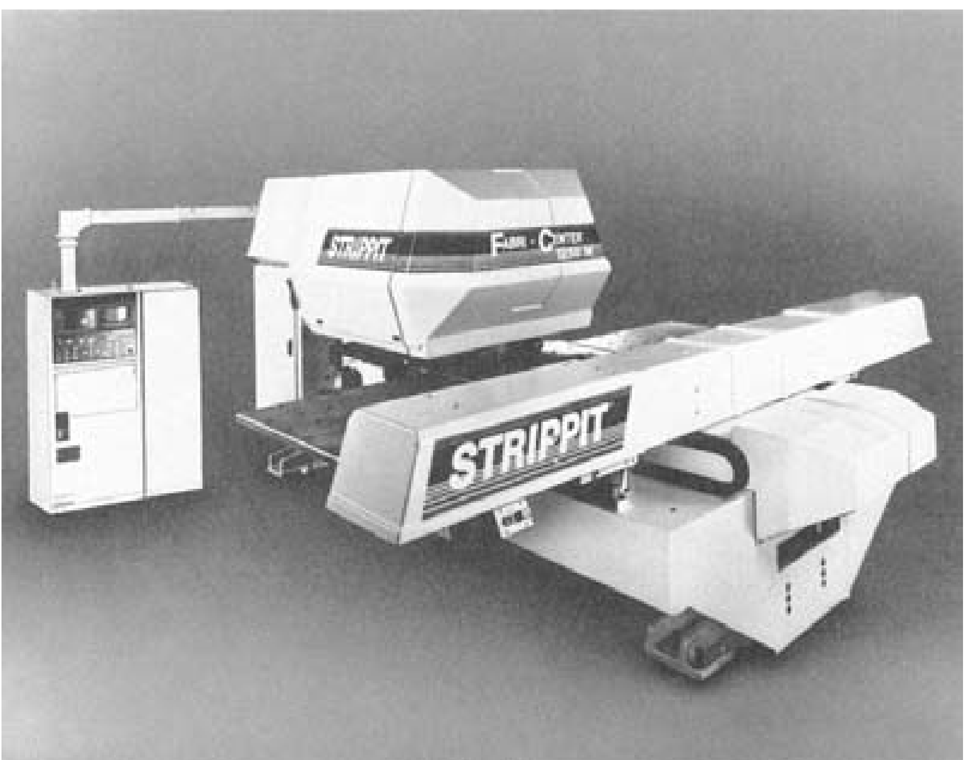




FIGURA 20.37 Prensa con armazón de lados rectos (fotografía por cortesía de Greenerd Press & Machine Company, Inc.).

Potencia y sistemas de transmisión Los sistemas de transmisión de las prensas pueden ser hidráulicos o mecánicos. Las ***prensas hidráulicas*** usan grandes cilindros y pistones para mover el pisón. Este sistema de potencia suministra típicamente carreras más largas que las de impulsión mecánica y pueden generar la fuerza de tonelaje completo a través de la carrera entera. Sin embargo es más lento. Su aplicación a las láminas de metal se limita normalmente al embutido profundo y a otras operaciones de formado donde sus características son ventajosas. Estas prensas disponen de una o más correderas independientes, llamadas de simple acción (corredera simple), doble acción (dos correderas) y así sucesivamente. Las prensas de doble acción son útiles en operaciones de embutido profundo cuando se requiere un control separado de la fuerza de punzón y la fuerza del sujetador.

En las ***prensas mecánicas*** se usan varios tipos de mecanismos de transmisión. Estos incluyen excéntrico, eje cigüeñal y de junta de bisagra como se ilustra en la figura 20.38.

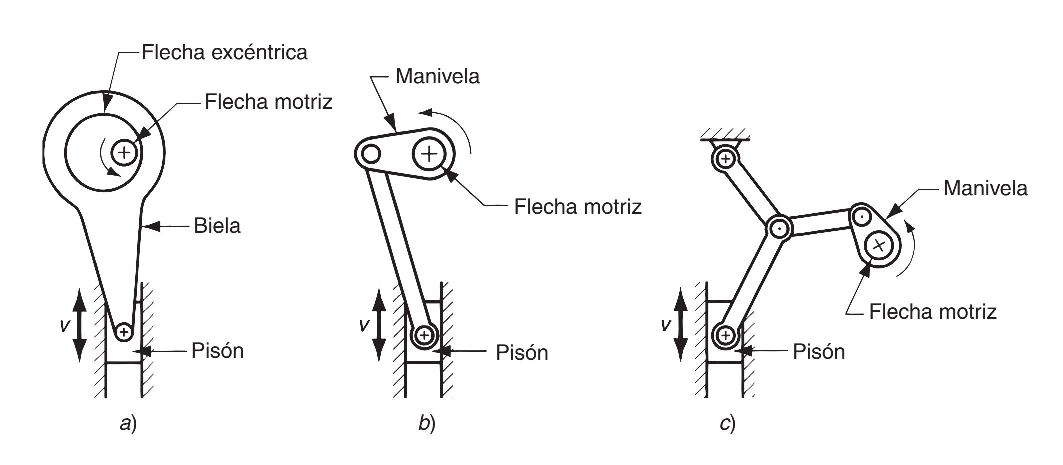


FIGURA 20.38 Tipos de transmisión para prensas destinadas al trabajo de metal en lámina: *a*) excéntrico, *b*) cigüeñal, y *c*) de junta de bisagra.

Estos mecanismos convierten el movimiento giratorio del motor en movimiento lineal del pisón. Utilizan un ***volante*** para almacenar la energía del motor, que usan posteriormente en las operaciones de estampado. Las prensas mecánicas que utilizan este tipo de transmisión alcanzan fuerzas muy altas en el fondo de su carrera y, por tanto, son muy apropiadas para operaciones de forma y punzonado. La junta de bisagra libera fuerzas muy altas cuando está en el fondo y por esa causa se usa frecuentemente en las operaciones de acuñado.

20.6 OPERACIONES CON LÁMINAS METÁLICAS NO REALIZADAS EN PRENSAS

Numerosas operaciones con láminas de metal no se realizan en prensas de troquelado convencional. En esta sección se examinarán varios de estos procesos: 1) formado por estirado, 2) doblado con rodillos y formado, 3) rechazado y 4) procesos de formado de alto nivel de energía.

20.6.1 Formado por estirado

El ***formado por estirado*** es un proceso de deformación de láminas metálicas en el cual la lámina se restira en forma intencional y dobla simultáneamente a fin de lograr un cambio de forma. El proceso se ilustra en la figura 20.39 para un doblado gradual relativamente simple. La pieza de trabajo se sujeta por una o más mordazas en cada extremo y luego se restira y dobla sobre un troquel positivo que contiene la forma deseada. El metal se somete a esfuerzos de tensión a un nivel por encima de su punto de fluencia. Cuando se libera la carga de tensión, el metal ha sido deformado plásticamente. La combinación de estirado y doblado da por resultado una recuperación elástica relativamente pequeña de la pieza. Una estimación de la fuerza requerida en formado por estirado se puede obtener multiplicando el área de la sección transversal de la lámina en dirección del tirón por el esfuerzo de fluencia del metal. En forma de ecuación,

$$F = L_t Y_f \tag{20.15}$$

donde F = fuerza de estiramiento, N (lb); L = longitud de la lámina en dirección perpendicular al estiramiento, mm (in); t = espesor instantáneo del material, mm (in); y Y_f = esfuerzo de fluencia del metal del trabajo, MPa (lb/in^2). La fuerza del troquel $F_{troquel}$, mostrado en la figura, puede determinarse balanceando los componentes verticales de la fuerza.

Mediante el formado por estirado se pueden lograr contornos más complejos que los mostrados en la figura, pero existen limitaciones sobre la forma de las curvas que se pueden hacer en la lámina. Este método de formado se usa extensivamente en las industrias aérea y aeroespacial para producir económicamente grandes piezas de lámina metálica en las cantidades moderadas típicas de dichas industrias.

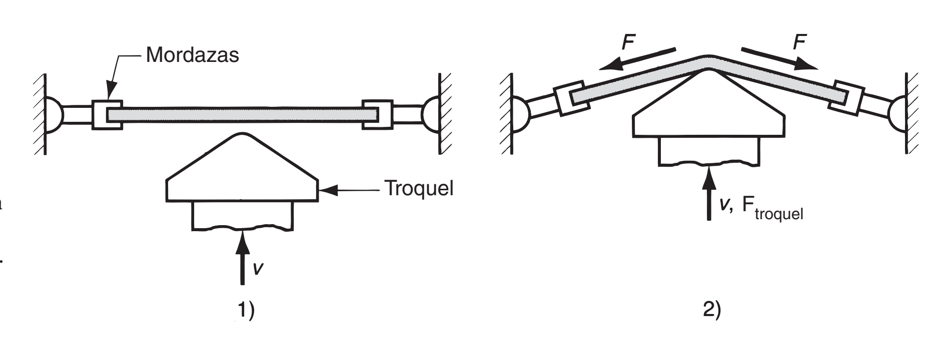


FIGURA 20.39 Formado por estirado: 1) inicio del proceso; 2) un troquel formador se presiona sobre el trabajo con una fuerza $F_{troquel}$, ocasionando el estirado y doblado de la lámina sobre la forma. F = fuerza de estiramiento.

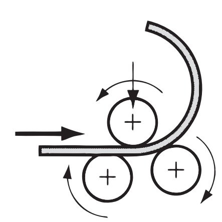


FIGURA 20.40 Doblado con rodillos.

20.6.2 Doblado y formado con rodillos

En las operaciones descritas en esta sección se usan rodillos para formar láminas metálicas. El ***doblado con rodillos*** es una operación en la cual generalmente se forman piezas grandes de lámina metálica en secciones curvas por medio de rodillos. En la figura 20.40 se muestra un arreglo posible de rodillos. Cuando la lámina pasa entre los rodillos, éstos se colocan uno junto al otro en una configuración que forma el radio de curvatura deseado en el trabajo. Por este método se fabrican componentes para grandes tanques de almacenamiento y recipientes a presión. Mediante esta operación también se pueden doblar perfiles estructurales, rieles de ferrocarril y tubos.

Una operación relacionada es el ***enderezado con rodillos*** en la cual se enderezan láminas no planas (u otras formas), pasándolas sobre una serie de rodillos. Los rodillos someten al trabajo a una serie de aplanados de los pequeños dobleces en direcciones opuestas; esto provoca que el material se enderece a la salida.

Formado con rodillos, también llamado ***formado con rodillos de contorno***, es un proceso continuo de doblado en el cual se usan rodillos opuestos para producir secciones largas de material, formado a partir de cintas o rollos de lámina. Generalmente se requieren varios pares de rodillos para lograr progresivamente el doblado del material en la forma deseada. El proceso se ilustra en la figura 20.41 para una sección en forma de U. Los productos hechos por formado con rodillos incluyen canales, canaletas, secciones laterales de metal (para casas), tuberías, tubos con costura y varias secciones estructurales. Aunque el formado con rodillos tiene la apariencia general de una operación de laminado (las herramientas son verdaderamente similares), la diferencia es que en el formado con rodillos se involucra más el doblado que la compresión del trabajo.

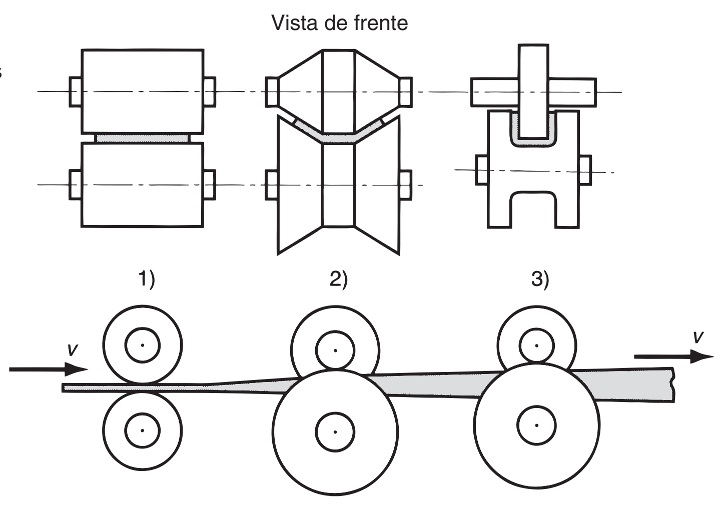


FIGURA 1.1 Formado en rodillos de una sección continua en canal: 1) rodillos rectos, 2) formado parcial y 3) forma final.

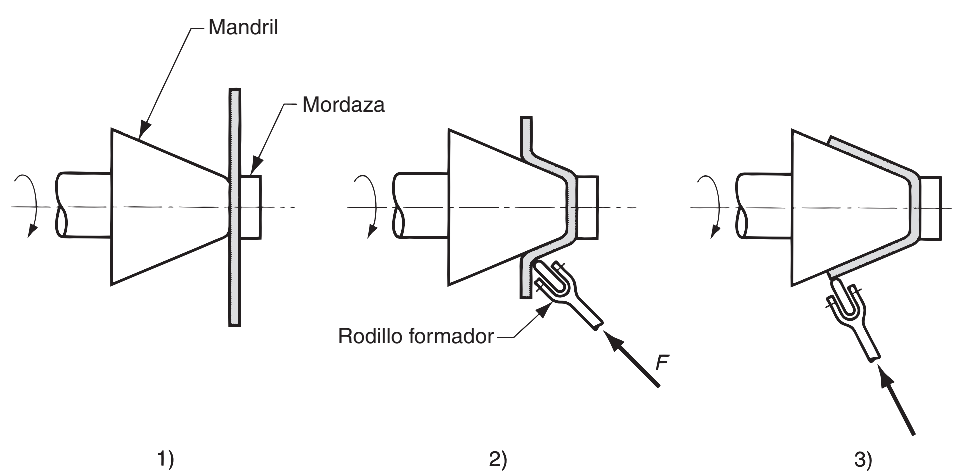


FIGURA 20.42 Rechazado convencional: 1) disposición al iniciar el proceso, 2) durante el rechazado y 3) proceso completo.

20.6.3 Rechazado

El ***rechazado*** es un proceso de formado de metal en el cual se da forma a una parte de simetría axial sobre un mandril u horma mediante una herramienta redondeada o rodillo. La herramienta o el rodillo aplican una presión muy localizada (en casi un punto de contacto) para deformar el trabajo por medio de movimientos axiales o radiales sobre la superficie de la pieza. Las formas geométricas típicas que se producen por rechazado incluyen copas, conos, hemisferios, tubos y cilindros. Hay tres tipos de operaciones de rechazado: 1) rechazado convencional, 2) rechazado cortante y 3) rechazado de tubos.

Rechazado convencional El rechazado convencional es la operación de rechazado básico. Como se ilustra en la figura 20.42, un disco de lámina se sostiene en el extremo de un mandril rotatorio que tiene la forma interior deseada para la pieza final, mientras la herramienta o rodillo deforma el metal contra el mandril. En algunos casos la forma inicial puede ser diferente a la de un disco plano. Como se indica en la figura, el proceso requiere una serie de pasos para completar el formado de la pieza. La posición de la herramienta la puede controlar un operador usando un punto de apoyo fijo para el apalancamiento necesario, o un método automático como control numérico. Estas alternativas son el ***rechazado manual*** y el ***rechazado de potencia***. El rechazado de potencia tiene la capacidad de aplicar fuerzas más altas a la operación, lo cual representa ciclos más rápidos y mayor capacidad en cuanto al tamaño del trabajo. También se logra un mejor control del proceso que en el rechazado manual.

El rechazado convencional dobla el metal alrededor de un eje circular en movimiento para conformar el metal de acuerdo con la superficie externa de un mandril de simetría axial. El espesor del metal permanece sin cambio (más o menos) respecto al espesor de la forma inicial. El diámetro de la forma debe ser algo más grande que el diámetro de la pieza resultante. El diámetro inicial requerido se puede estimar suponiendo volúmenes constantes, antes y después del rechazado.

La aplicación del rechazado convencional incluye la producción de formas cónicas y curvas en bajas cantidades. Por este proceso se puede hacer piezas con diámetros muy grandes, hasta de 5 m (15 ft), o más. Los métodos alternos de formado de lámina podrían requerir altos costos en los troqueles. La horma de rechazado se puede hacer de madera u otro material suave fácil de formar. Por tanto es una herramienta de bajo costo comparada con el punzón y troquel requeridos para embutido profundo, que podría ser un proceso sustituto para algunas piezas.

Rechazado cortante En el ***rechazado cortante*** se forma la pieza sobre el mandril por medio de un proceso de deformación cortante en el cual el diámetro exterior permanece

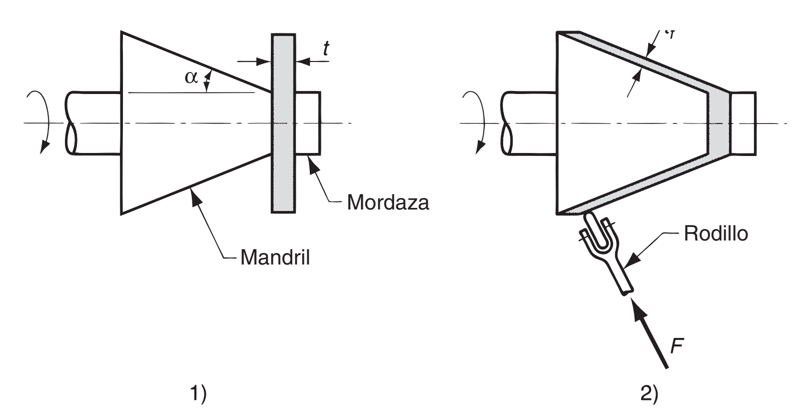


FIGURA 20.43 Rechazado cortante: 1) disposición y 2) proceso terminado.

constante y el espesor de la pared se reduce, como se muestra en la figura 20.43. Esta deformación cortante y el consiguiente adelgazamiento del metal distingue este proceso de la acción de doblado en el rechazado convencional. Se han usado otros nombres para el rechazado cortante, como ***torneado de flujo, formado por corte*** y ***forjado rotatorio***. El proceso se ha aplicado en la industria aeroespacial para formar piezas grandes como los conos para la nariz de los cohetes.

Para una forma cónica simple, el espesor resultante de la pared rechazada puede determinarse fácilmente a través de la relación de la ley de los senos:

$$t_f = t \text{ sen } \alpha \tag{20.16}$$

donde t_f = espesor final de la pared después de rechazada, t = espesor inicial del disco, y α = ángulo del mandril (en realidad medio ángulo). El adelgazamiento se cuantifica algunas veces por la reducción del rechazado r:

$$r = \frac{t - t_f}{t} \tag{20.17}$$

Existen límites a la cantidad de adelgazamiento que puede soportar el metal en una operación de rechazado con esfuerzo cortante antes de que ocurra la fractura. Esta reducción máxima se correlaciona bien con la reducción de área en la prueba de tensión [7].

Rechazado de tubos El ***rechazado de tubos*** se usa para reducir el espesor de las paredes y aumentar la longitud de un tubo mediante la aplicación de un rodillo al trabajo sobre un mandril cilíndrico, como se muestra en la figura 20.44. El rechazado de tubos es similar al rechazado cortante salvo que la pieza inicial es un tubo, en lugar de una forma plana. La operación se puede realizar aplicando el rodillo externamente contra el trabajo (usando un mandril cilíndrico en el interior del tubo) o internamente (usando un troquel alrededor del tubo). También es posible formar perfiles en las paredes del cilindro, como se muestra en la figura 20.44*c*), controlando el recorrido del rodillos al moverse tangencialmente a lo largo de la pared.

La reducción por rechazado para la operación de rechazado de tubos, la cual produce una pared de espesor uniforme, se puede determinar como en el rechazado cortante por la ecuación 20.17.

20.6.4 Formado por alta velocidad de energía

Se han creado varios procesos para el formado de metales usando grandes cantidades de energía aplicada en tiempos muy cortos. Debido a esta característica se llaman ***formado por alta velocidad de energía*** (HERF, por sus siglas en inglés). Éstos incluyen el formado por explosión, electrohidráulico y electromagnético.

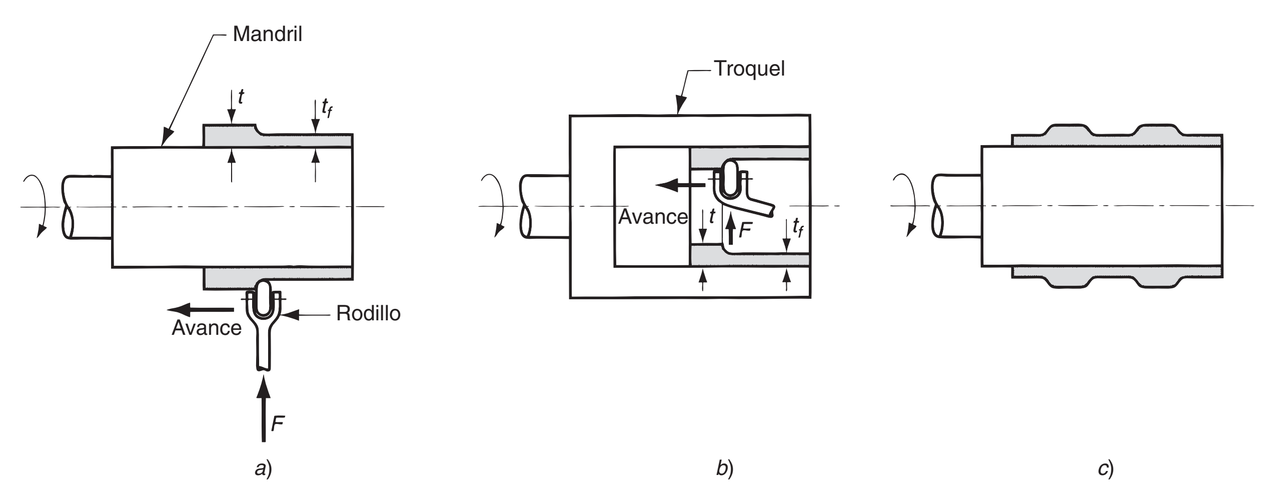
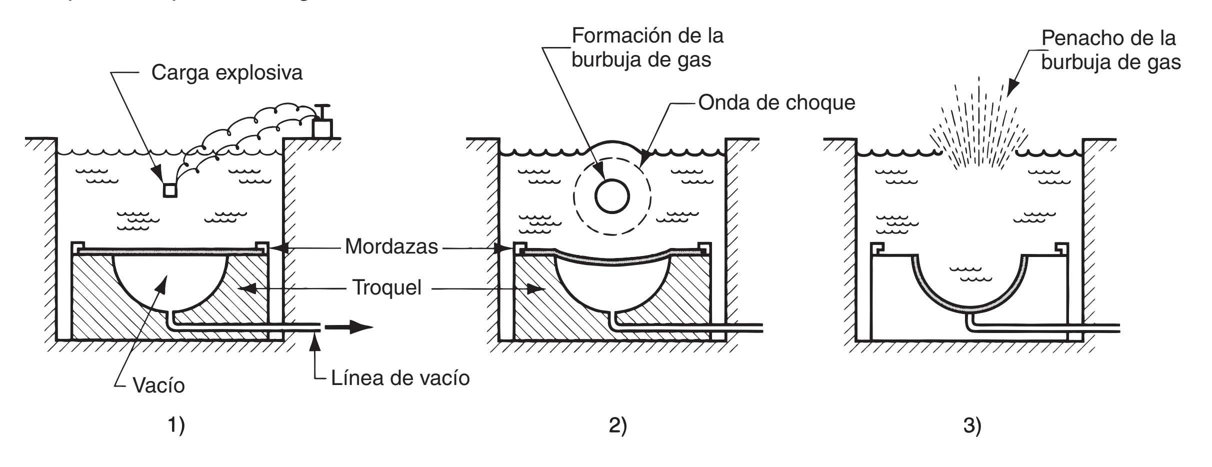


FIGURA 20.44 Rechazado de tubos: *a*) externo, *b*) interno y *c*) perfilado.

Formado por explosión El ***formado por explosión*** involucra el uso de una carga explosiva para formar una lámina o placa de metal dentro de la cavidad de un troquel. Un método de instrumentar el proceso se ilustra en la figura 20.45. La pieza de trabajo se fija y se sella sobre el troquel, practicando el vacío en la cavidad. El aparato se coloca entonces en un recipiente grande de agua. Se coloca una carga explosiva en el agua a cierta distancia sobre el trabajo. La detonación de la carga produce una onda de choque cuya energía se transmite a través del agua, causando la deformación rápida de la pieza dentro de la cavidad. El tamaño de la carga explosiva y la distancia a la que debe colocarse sobre la pieza es más bien materia de arte y experiencia. El formado con explosivos se reserva para piezas grandes, típicas de la industria aeroespacial.

Formado electrohidráulico El ***formado electrohidráulico*** es un proceso de alta energía en el cual se genera una onda de choque para deformar el trabajo en la cavidad de un troquel a través de una descarga eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un fluido de transmisión (agua). Debido al principio de operación, este proceso se llama también ***formado de descarga eléctrica***. La instalación para dicho proceso se ilustra en la figura 20.46. La energía eléctrica se acumula en grandes capacitores y luego se transmite a los electrodos. El formado electrohidráulico es similar al formado por explosión. Las diferencias están en

FIGURA 20.45 Formado por explosión: 1) disposición, 2) detonación del explosivo y 3) la onda de choque forma la pieza y el penacho escapa de la superficie del agua.



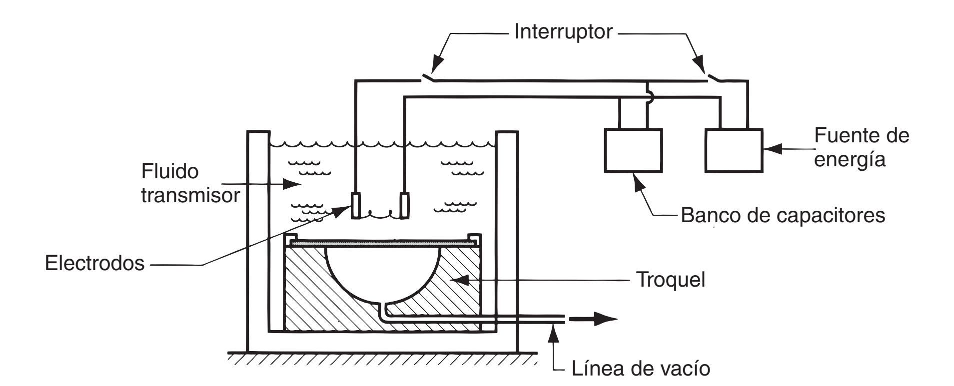


FIGURA 20.46 Disposición del formado electrohidráulico.

la forma de generar la energía y en las menores cantidades de energía que se manejan. Esto limita el formado electrohidráulico a piezas de mucho menor tamaño.

Formado electromagnético El ***formado electromagnético***, también llamado ***formado de pulso magnético***, es un proceso en el cual la lámina metálica se deforma por la fuerza mecánica de un campo electromagnético inducido en la pieza de trabajo por una bobina electrificada. La bobina está electrificada por un capacitor y genera un campo magnético que origina corrientes parásitas en el trabajo con su propio campo magnético. El campo inducido se opone al campo primario, produciendo una fuerza mecánica que deforma la pieza hacia la cavidad que la rodea. Inventado en la década de 1960, el formado electromagnético es el proceso de formado por alta velocidad de energía más extensamente usado en la actualidad [8]. Se usa para formar piezas tubulares, como se ilustra en la figura 20.47.

20.7 DOBLADO DE MATERIAL TUBULAR

En el capítulo anterior se analizaron varios métodos para producir tubos y tuberías, y el rechazado de tubos se describió en la sección 20.6.3. En esta sección se examina los métodos para el doblado de tubos y otros métodos de formado. El doblado de material tubular es más difícil que el de la lámina porque un tubo tiende a romperse o deformarse cuando se hacen intentos para doblarlo. Se usan mandriles flexibles especiales que se insertan en el tubo antes de doblarlo para que soporten las paredes durante la operación.

Algunos de los términos que se usan en el doblado de tubos se definen en la figura 20.48. El radio del doblez R se define respecto a la línea central del tubo. Cuando el tubo se dobla, la pared interior del doblez se comprime y la pared exterior se tensa. Esta condición de esfuerzos causa adelgazamiento y elongación de la pared externa, y engrosamiento y

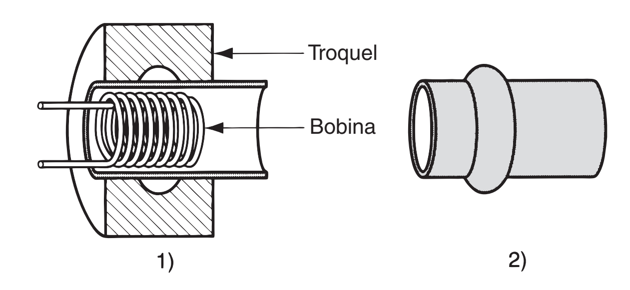


FIGURA 20.47 Formado electromagnético: 1) disposición en la cual se inserta una bobina en la pieza tubular rodeada por el troquel, 2) pieza formada.

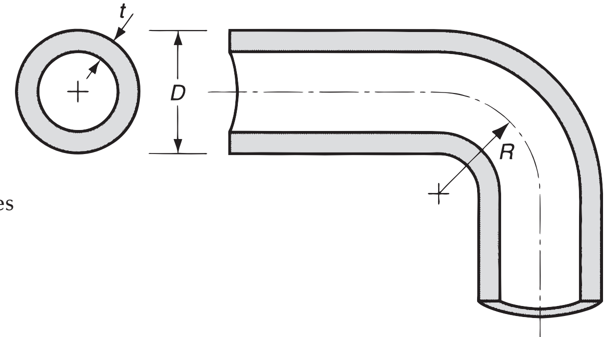
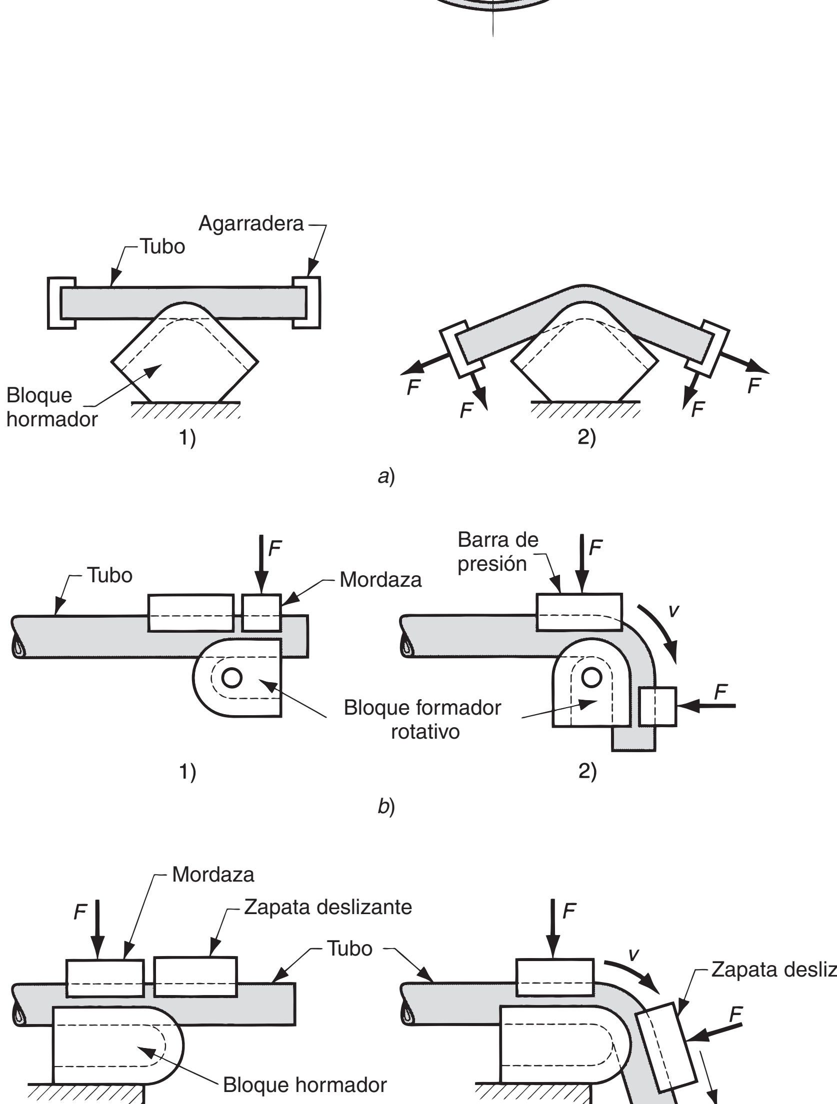


FIGURA 20.48 Dimensiones y términos en el doblado de tubos: D = diámetro exterior del tubo, R = radio de doblado y t = espesor de la pared.



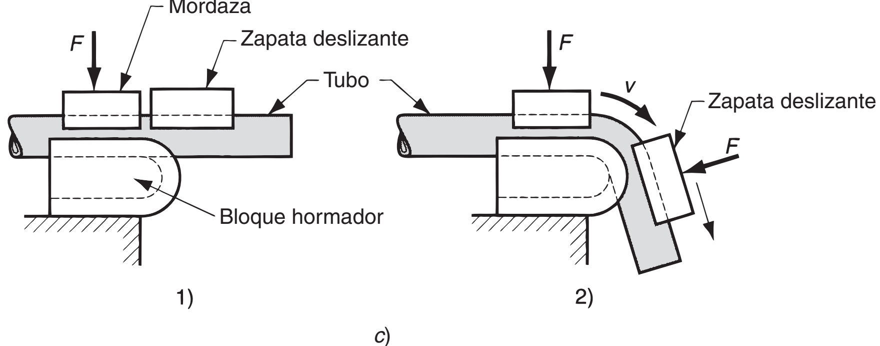


FIGURA 20.49 Métodos de doblado de tubos: *a*) doblado por estirado, *b*) doblado por arrastre y *c*) doblado por compresión. Para cada método: 1) inicio del proceso, 2) durante el doblado. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada.

acortado de la pared interna. Como consecuencia hay una tendencia en las paredes interna y externa de ser forzadas hacia el lado opuesto para causar el aplanamiento de la sección transversal del tubo. Debido a esta tendencia de aplanamiento, el radio mínimo del doblez R al cual se puede doblar el tubo es alrededor de 1.5 veces el diámetro D cuando se usa un mandril, y 3.0 veces D cuando no se usa el mandril [8]. El valor exacto depende del factor de pared WF, que es el diámetro dividido entre el espesor de la pared t. Valores más altos de WF aumentan el radio mínimo del doblez; esto es, el doblado de tubos es más difícil para las paredes delgadas. La ductilidad del material de trabajo es también un factor importante en el proceso.

Se usan varios métodos para doblar tubos (y secciones similares), como se ilustra en la figura 20.49. El ***doblado por estirado*** se realiza tirando y doblando el tubo alrededor de un bloque de horma fija, como se muestra en la figura 20.49*a*). El ***doblado por arrastre*** se realiza fijando el tubo contra un bloque formador y arrastrando el tubo a través del doblez por rotación del bloque, como se muestra en b. Se usa una barra de presión para soportar el trabajo al ser doblado. En el ***doblado por compresión*** se usa una zapata deslizante para envolver el tubo alrededor del contorno de un bloque de forma fija, como se observa en el inciso c. El ***doblado con rodillos*** (sección 20.6.2) asociado generalmente con el formado de material laminar se usa también para doblar tubos y otras secciones.

REFERENCIAS

[1] Early, D. F. y Reed, E. A., ***Techniques of Pressworking Sheet Metal***, 2a. ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1974.

[2] Hoffman, E. G., ***Fundamentals of Tool Design***, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.

[3] Hasford, W. F. y Cadell, R. M., ***Metal Forming: Mechanics and Metallurgy***, 2a. ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1993.

[4] Kalpakjian, S., ***Manufacturing Process for Engineering Materials***,4a. ed., Prentice-Hall/Pearson, Upper Saddle River, N.J. 2003.

[5] Lange, K., *et al*. (eds.)., ***Handbook of metal Forming. Society of Manufacturing Engineers,*** Dearborn, Mich., 1995.

[6] Mielnik, E. M., ***Metalworking Science and Engineering***, McGraw-Hill, Inc., Nueva York,1991.

[7] Schey, J. A., ***Introduction to Manufacturing Processes***, 2a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 2000.

[8] Wick, C., *et al*. (editores), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. II, Forming, Society of Manufacturing Engineers, Dearbon, Mich., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

20.1. Identifique los tres tipos básicos de operaciones con láminas metálicas.

20.2. En las operaciones de trabajado metálico de láminas, a) ¿cuál es el nombre de las herramientas? y b) ¿cuál es el nombre de la herramienta mecánica utilizada en las operaciones?

20.3. En el corte de formas de piezas redondas de lámina metálica, indique cómo debe aplicarse el espacio a los diámetros del punzón y del troquel.

20.4. ¿Cuál es la diferencia entre una operación de corte en trozos y una operación de partición?

20.5. ¿Cuál es la diferencia entre una operación de muescado y semimuescado?

20.6. Describa los dos tipos de operaciones de doblado en placas metálicas: doblado en V y doblado de bordes.

20.7. ¿Qué es lo que compensa la tolerancia al doblado?

20.8. ¿Qué es la recuperación elástica en el doblado de láminas metálicas?

20.9. Defina el embutido en el contexto del trabajado metálico de láminas.

20.10. ¿Cuáles son algunas de las medidas simples usadas para valorar la factibilidad de una operación propuesta de embutido acopado?

20.11. Distinga entre reembutido y embutido inverso.

20.12. ¿Cuáles son algunos de los defectos posibles en el embutido de piezas de lámina?

20.13. ¿Qué es una operación de estampado?

20.14. ¿Qué es el formado por estirado?

20.15. Identifique los componentes principales de un troquel de estampado para el punzonado.

20.16. ¿Cuáles son las dos categorías básicas de los armazones estructurales usados en las prensas de estampado?

20.17. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas relativas de las prensas mecánicas sobre las hidráulicas en el trabajo de lámina?

20.18. ¿Qué es el proceso Guerin?

20.19. Identifique el principal problema técnico en el doblado de tubos.

20.20. Describa las diferencias entre el doblado con rodillos y el formado con rodillos.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 21 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

20.1. La mayoría de las operaciones de trabajado de láminas metálicas se llevan a cabo como: *a*) trabajado en frío, *b*) trabajado en caliente o *c*) trabajado en caliente debajo de la temperatura de cristalización.

20.2. En una operación de corte de hojas metálicas que se utiliza para producir una pieza plana con un agujero en el centro, la pieza en sí misma se llama formado y la porción de desperdicio que se cortó para hacer el agujero se llama pedacería: *a*) verdadero o *b*) falso.

20.3. Al incrementarse la dureza de la lámina, el espacio entre el punzón y el troquel debe: *a*) reducirse, *b*) incrementarse o *c*) no afectarse.

20.4. Un pedazo redondo producido en el perforado de un agujero tendrá el mismo diámetro que: *a*) la abertura del troquel o *b*) el punzón.

20.5. En una operación de punzonado, ¿de qué propiedad mecánica de la lámina depende la fuerza de corte? (una respuesta correcta): *a*) resistencia a la compresión, *b*) módulo de elasticidad, *c*) resistencia al corte, *d*) tasa de deformación, *e*) resistencia a la tensión o *f*) resistencia a la fluencia.

20.6. ¿Cuál de las descripciones siguientes se aplica a la operación de doblado en V cuando se compara con una operación de doblado de los bordes (dos respuestas correctas)?: *a*) herramientas costosas, *b*) herramientas baratas, *c*) limitado a dobleces de 90º o menores, *d*) utilizado en elevados volúmenes de producción, *e*) utilizados en bajos volúmenes de producción y *f*) utiliza una base de presión para conservar la lámina metálica en una posición fija.

20.7. ¿Cuál de los siguientes esfuerzos y deformaciones involucran el doblado de lámina? (dos respuestas correctas): *a*) a la compresión, *b*) al corte y *c*) a la tensión.

20.8. ¿Cuál de las siguientes es la mejor definición de tolerancia al doblado?: *a*) cantidad en la que el troquel excede del punzón, *b*) cantidad de recuperación elástica experimentada por el metal después de doblado, *c*) factor de seguridad usado en el cálculo de la fuerza de doblado, *d*) longitud antes del doblado de la sección recta del metal que se dobla.

20.9. En una operación de doblado de lámina metálica, la recuperación elástica es el resultado de uno de los siguientes: *a*) módulo de elasticidad del metal, *b*) recuperación elástica del metal, *c*) sobredoblado, *d*) sobrestirado o *e*) resistencia a la fluencia del metal.

20.10. ¿Cuál de las siguientes son variantes de las operaciones de doblado de láminas metálicas? (puede haber más de una respuesta): *a*) acuñado, *b*) formado de bridas, *c*) doblez, *d*) planchado, *e*) muescado, *f*) rechazado cortante, *g*) recortado y *h*) doblado de tubo.

20.11. Las siguientes son medidas de factibilidad para varias operaciones de embutido acopado, ¿cuál de las operaciones puede ser factible? (tres mejores respuestas): *a*) $DR = 1.7$, *b*) $DR = 2.7$, *c*) $r = 0.35$, *d*) $r = 0.65$ y *e*) $t/D = 2\%$.

20.12. La fuerza de sujeción en el embutido es generalmente respecto a la fuerza máxima de embutido: *a*) mayor, *b*) igual o *c*) menor.

20.13. ¿Cuál de los siguientes troqueles de estampado es el más complicado?: *a*) troquel para punzonado, *b*) troquel combinado, *c*) troquel compuesto, *d*) troquel deslizante para el doblado de bordes, *e*) troquel progresivo o *f*) troquel en V.

20.14. ¿Cuál de los siguientes tipos de prensa se asocia generalmente con una mayor velocidad de producción en las operaciones de estampado de lámina?: *a*) de cama ajustable, *b*) inclinable con abertura posterior, *c*) prensa plegadora, *d*) estructura en "c" sólida y *e*) de lados rectos.

20.15. ¿Cuáles de los siguientes procesos se clasifican como procesos de formado por alta velocidad de energía? (dos mejores respuestas): *a*) maquinado electroquímico, *b*) formado electromagnético, *c*) cortado con haz de electrones, *d*) formado por explosión, *e*) proceso Guerin, *f*) hidroformado, *g*) reembutido y *h*) rechazado cortante.

PROBLEMAS

Operaciones de corte

20.1. Se usa una cizalla mecánica para cortar acero laminado en frío de 4.75 mm de grueso. ¿A qué espacio debe ajustarse la cizalla para producir el corte óptimo?

20.2. Se ejecuta una operación de corte de formas sobre un acero laminado en frío de 2.0 mm de grueso (medio endurecido). La pieza es circular con diámetro de 75.0 mm. Determine los tamaños adecuados del punzón y del troquel para esta operación.

20.3. Se usará un troquel compuesto para cortar la forma y punzonar una arandela de lámina de aluminio aleado de 3.50 mm de grueso. El diámetro exterior de la arandela es de 50 mm y el diámetro interior es de 15.0 mm. Determine: *a*) los tamaños del punzón y del troquel para la operación de punzonado y *b*) los tamaños del punzón y el troquel para la operación de perforado.

20.4. Se diseña un troquel para corte de formas para cortar el contorno de la pieza que se muestra en la figura P20.4. El material tiene 4 mm de grueso y es de acero inoxidable (medio endurecido). Determine las dimensiones del punzón para corte de formas y la abertura del troquel.

20.5. Determine la fuerza de corte requerida en el problema 20.2, si el acero tiene una resistencia al corte igual a 325 MPa y una resistencia a la tensión de 450 MPa.

20.6. Determine el peso mínimo de la prensa para realizar el punzonado y la operación de perforado en el problema 20.3, si la lámina de aluminio tiene una resistencia a la tensión igual a 310 MPa, un coeficiente de resistencia de 350 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.12. *a*) Suponga que el punzonado y el perforado ocurren simultáneamente. *b*) Suponga que las perforaciones se realizan en etapas por lo que el perforado ocurre primero que el punzonado.

FIGURA P20.4 Forma para la pieza del problema 20.4 (dimensiones en mm).

20.7. Determine los requerimientos de tonelaje para la operación de corte de formas del problema 20.4 si el acero inoxidable tiene una resistencia al corte de 600 MPa.

20.8. El supervisor de la sección de prensas le informa que hay un problema en la operación de punzonado, durante la cual se está produciendo rebaba excesiva. ¿Cuáles son las posibles causas de la rebaba y qué se puede hacer para corregir esta situación?

Doblado

20.9. Una operación de doblado se realiza sobre un acero laminado en frío de 5.00 mm de grueso. Los dibujos de la pieza se muestran en la figura P20.9. Determine el tamaño de la forma requerida.

20.10. Resuelva el problema 20.9 con un radio de doblado R = 11.35 mm.

20.11. Un perfil en forma de L se dobla en una operación de doblado en V en una prensa de cortina a partir de una forma plana de 4.0 in por 1.5 in con un espesor de 5/32 in. El doblez de 90º se hará a la mitad de la longitud de 4 in. *a*) Determine las dimensiones de los dos lados iguales que resultarán después del doblado, si el radio del doblado es de 3/16 in. Por conveniencia estos lados deben medirse al principio del radio del doblez. *b*) Determine también la longitud del eje neutral de la pieza después del doblado y *c*) ¿dónde se debe fijar el tope en la prensa de cortina respecto a la longitud inicial de la pieza?

20.12. Determine la fuerza de doblado que se requiere en el problema 20.9, si el doblado se realizará en un troquel en V, con una abertura del troquel de 40 mm. El material tiene una resistencia a la tensión de 600 MPa y una resistencia al corte de 430 MPa.

20.13. Resuelva el problema 20.12, pero esta vez la operación se realiza usando un troquel deslizante con una abertura del troquel igual a 28 mm.

20.14. Determine la fuerza de doblado que se requiere en el problema 20.11 si el doblado se realiza en un troquel en V con una abertura del troquel de 1.25 in. El material tiene una resistencia a la tensión de 70 000 lb/in^2.

20.15. Repite el problema 20.14, excepto porque la operación se realiza usando un troquel deslizante con una abertura de 0.75 in.

20.16. Una pieza de lámina de 3.0 mm de grueso y 20.0 mm de largo se dobla a un ángulo incluido de 60º y un radio de doblez de 7.5 mm en un troquel en V. El metal tiene una resistencia a la tensión de 340 MPa. Calcule la fuerza requerida para doblar la parte si la abertura del troquel es de 15 mm.

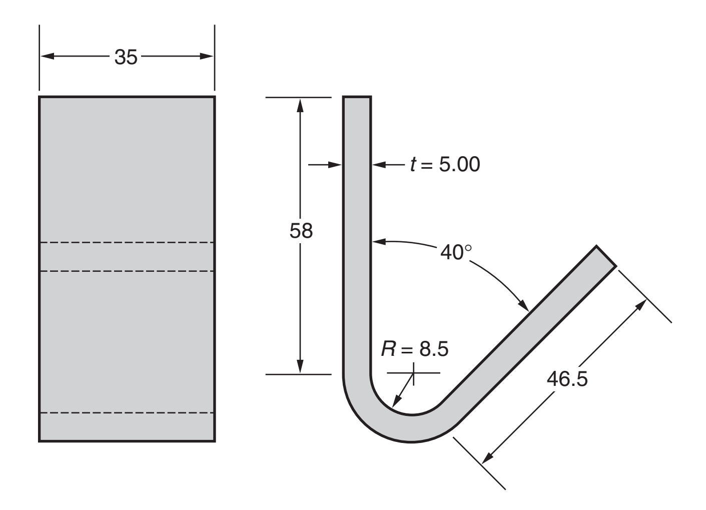


FIGURA P20.9 Pieza en la operación de doblado del problema 20.9 (dimensiones en mm).

Operaciones de embutido

20.17. Deduzca una expresión para la reducción *r* en el embutido como una función de la relación de embutido *DR*.

20.18 Se forma un vaso en una operación de embutido profundo, la altura del vaso es de 75 mm y su diámetro interior es de 100 mm. La lámina metálica tiene un espesor de 2 mm. Si el diámetro de la forma es de 225 mm, determine: *a*) la relación de embutido, *b*) la reducción, *c*) la relación entre el espesor y el diámetro y *d*) ¿es posible la operación?

20.19. Repite el problema 20.18, excepto porque el tamaño de la forma inicial tiene un diámetro de 175 mm.

20.20. Se ejecuta una operación de embutido profundo en la cual el diámetro es de 4.25 in y la altura es de 2.65 in. El espesor del material es de 3/16 in y el diámetro de la forma inicial es de 7.7 in. El radio del punzón y del troquel es de 5/32 in. El metal tiene una resistencia a la tensión de 65 000 lb/in^2, una resistencia a la fluencia de 32 000 lb/in^2 y una resistencia al corte de 40 000 lb/in^2. Determine: *a*) la relación de embutido, *b*) la reducción, *c*) la fuerza de embutido y *d*) la fuerza del sujetador de formas.

20.21. Repite el problema 20.20, excepto porque el espesor del material es de t = 1/8 in.

20.22. En una operación de embutido el diámetro interior es de 80 mm y la altura es de 50 mm. El espesor del material es de 3.0 mm y el diámetro inicial de la forma es de 150 mm. El radio del punzón y del troquel es de 4 mm. La resistencia a la tensión es de 400 MPa y la resistencia a la fluencia del metal es de 180 MPa. Determine: *a*) la relación de embutido, *b*) la reducción, *c*) la fuerza de embutido y *d*) la fuerza del sujetador de la forma.

20.23. Se ejecuta una operación de embutido en una forma de lámina de 1/8 de in de espesor. La altura de la copa (dimensión interna) es de 3.8 in y el diámetro es de 5.0 in (dimensión interna). Suponiendo que el radio del punzón es de 0, calcule el diámetro inicial de la forma para completar la operación sin dejar material para la pestaña. ¿Es posible la operación? (ignore el hecho de que el radio del punzón es demasiado pequeño).

20.24. Resuelva el problema 20.23 usando un radio del punzón de 0.375 in.

20.25. Una operación de embutido se ejecuta sobre un material de 3.0 mm de grueso. La pieza es un vaso cilíndrico con una altura de 50 mm y un diámetro interno de 70 mm. Suponga que el radio de la esquina en el punzón es de cero. *a*) Encuentre el tamaño de la forma inicial D_b, *b*) ¿es posible la operación de embutido?

20.26. Resuelva el problema 20.25, usando una altura de 60 mm.

20.27. Resuelva el problema 20.26, usando un radio de la esquina en el punzón de 10 mm.

20.28. El supervisor de la sección de embutido le enseña varias muestras de piezas que han sido embutidas; las muestras tienen varios defectos. Una tiene orejas, otra tiene arrugas y la tercera tiene desgarres en la base. ¿Cuáles son las causas de cada uno de estos defectos y qué solución propondría usted?

20.29. Una pieza en forma de copa se embute sin sujetador a partir de una lámina de metal cuyo espesor es de 0.25 in. El diámetro interior de la copa es de 2.5 in, su altura es de 1.5 in y el radio de la esquina en la base es de 0.375 in. *a*) ¿Cuál es el diámetro mínimo de la forma inicial que puede usarse de acuerdo con la ecuación 20.14? *b*) ¿Proporciona esta forma el material suficiente para completar la copa?

Otras operaciones

20.30. Una pieza de trabajo de 20 in de longitud se estira en una operación de formado por estirado a las dimensiones que se muestran en la figura P20.30. El espesor del material inicial es 3/16 in y el ancho es de 8.5 in. El metal tiene una curva de fluencia definida por un coeficiente de resistencia de 75 000 lb/in^2 y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.20. La resistencia a la fluencia del material es de 30 000 lb/in^2. *a*) Encuentre la fuerza de estiramiento *F* requerida al inicio de la operación, cuando ocurre la primera fluencia. Determine: *b*) la deformación real experimentada por el metal, *c*) la fuerza de estirado *F*, *d*) la fuerza del troquel $F_{troquel}$ al final cuando se forma la pieza, como se indica en la figura P20.30*b*).

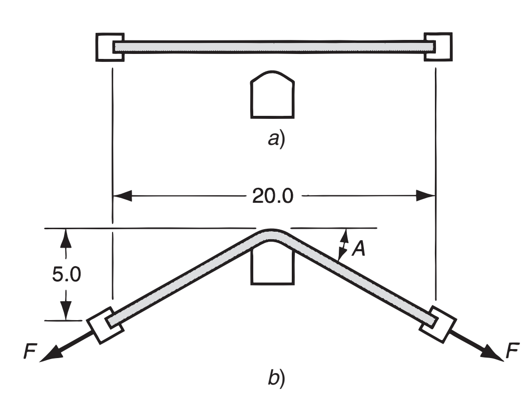


FIGURA P20.30 Operación de formado por extensión: *a*) antes y *b*) después (las dimensiones están en pulgadas).

20.31. Determine el diámetro del disco inicial requerido para rechazar la pieza que se muestra en la figura P20.31, usando una operación de rechazado convencional. El espesor inicial es de 2.4 mm.

20.32. Si la pieza ilustrada en la figura P20.31 se hiciera por rechazado con deformación de corte, determine: *a*) el espesor de la pared a los largo de la porción en forma de cono y b) la reducción del rechazado *r*.

20.33. Determine la deformación cortante que experimenta el material que se rechaza en el problema 20.32.

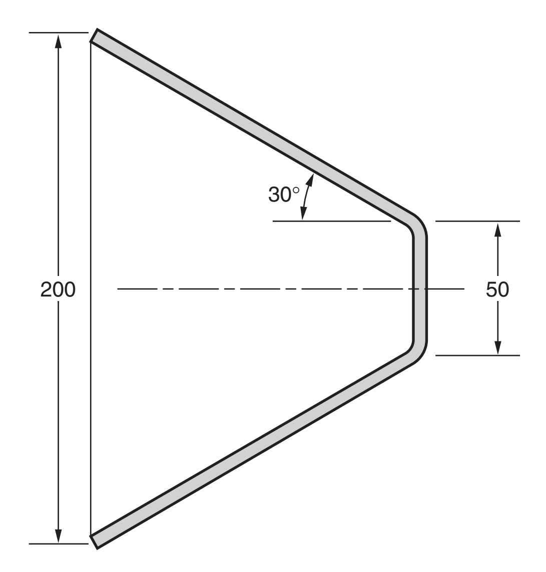


FIGURA P20.31 Pieza en rechazado convencional (sección transversal). Las dimensiones están en mm.

20.34. Un tubo de 75 mm de diámetro se dobla en una forma más bien compleja con una serie de operaciones de doblado simple. El espesor de la pared del tubo es de 4.75 mm. Los tubos se usarán para conducir fluidos en una planta química. En uno de los dobleces, donde el radio del doblez es de 125 mm, las paredes del tubo están mal aplanadas. ¿Qué se puede hacer para corregir el defecto?

Parte VI
Procesos de remoción de material

21 TEORÍA DEL MAQUINADO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los ***procesos de remoción de material*** son una familia de operaciones de formado (figura 1.4) en las que el material sobrante es removida de una pieza de trabajo inicial de tal manera que lo que queda es la forma final que se desea conseguir. El "árbol familiar" se muestra en la figura 21.1. La rama más importante de la familia es el ***maquinado convencional***, en el que una herramienta aguda de corte se utiliza para cortar mecánicamente el material y así alcanzar la forma deseada. Los tres procesos principales de maquinado son el torneado, el taladrado y el fresado. Las "otras operaciones de maquinado" de la figura 21.1 incluyen el perfilado, el cepillado, el escariado y el aserrado. Este capítulo comienza con una cobertura del maquinado, el cual se prolonga hasta el capítulo 24.

Otro grupo de procesos de remoción de material es el ***proceso abrasivo***, que de forma mecánica remueve el material mediante la acción de partículas abrasivas duras. Este grupo de procesos, dentro del cual se encuentra el molido, se estudia en el capítulo 25. Los "demás procesos abrasivos" de la figura 21.1 son afilado, fundido y superacabado. Por último, se encuentran los ***procesos no tradicionales***, que utilizan otras formas de energía aparte de la herramienta de corte agudo o de partículas abrasivas para remover el material. Las formas de energía incluyen la mecánica, la electromecánica, la térmica y la química. Los procesos no tradicionales se estudian en el capítulo 26.

El ***maquinado*** es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una pieza de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la pieza deseada. La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar la viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie. El maquinado se aplica más frecuentemente para formar metales. El proceso se ilustra en el diagrama de la figura 21.2.

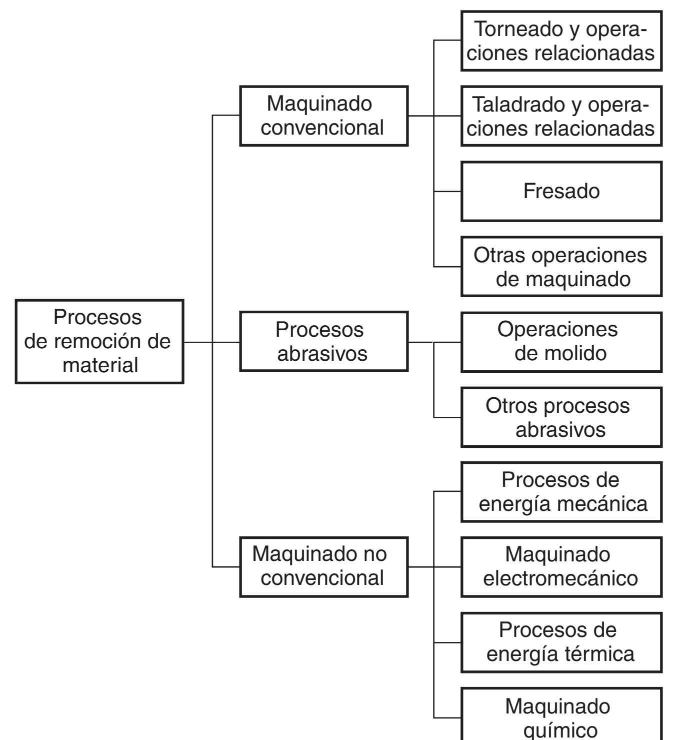
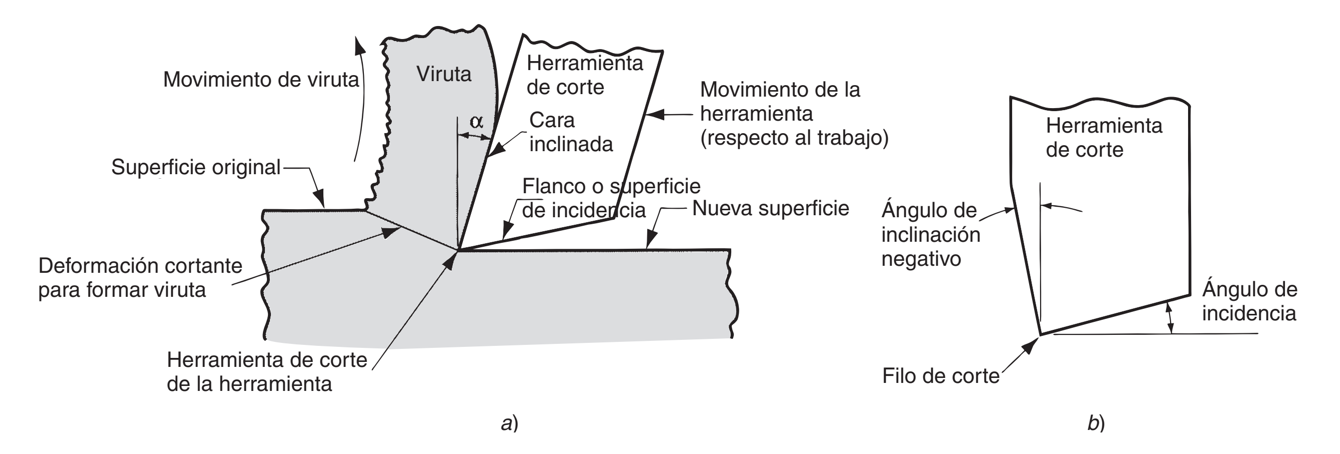


FIGURA 21.1 Clasificación de los procesos de remoción de material.

El maquinado es uno de los procesos de manufactura más importantes. La Revolución Industrial y el crecimiento de las economías basadas en la manufactura de todo el mundo se pueden describir en gran parte por el desarrollo de varias operaciones de maquinado (véase la nota histórica 22.1). Las siguientes razones explican la importancia de las operaciones de maquinado desde el punto de vista comercial y tecnológico.

- ***Amplia gama de materiales de trabajo*** El maquinado se puede aplicar a una amplia variedad de materiales de trabajo. Prácticamente todos los metales sólidos se pueden maquinar. Los plásticos y los compuestos plásticos se pueden cortar también por maquinado. Las cerámicas presentan dificultades debido a su alta dureza y fragilidad; sin embargo, la mayoría de las cerámicas se pueden cortar exitosamente mediante procesos de maquinado abrasivo, analizados en el capítulo 25.

FIGURA 21.2 *a*) Sección transversal de proceso de maquinado. *b*) Herramienta con ángulo de inclinación negativo; compare con el ángulo de inclinación positivo en *a*).



- ***Variedad de formas y características geométricas***. El maquinado se puede usar para generar cualquier forma geométrica regular, como superficies planas, agujeros redondos y cilindros. Mediante la introducción de variaciones en las trayectorias y formas de las herramientas, se puede crear formas geométricas irregulares, como cuerdas de tornillos y ranuras T. Combinando varias operaciones de maquinado en secuencia, se puede producir formas de complejidad y variedad ilimitada.
- ***Precisión dimensional.*** El maquinado puede producir dimensiones con tolerancias muy estrechas de menos de ±0.025 mm (±0.001 in). Es más preciso que muchos otros procesos.
- ***Acabados superficiales de calidad.*** El maquinado es capaz de crear acabados superficiales muy tersos que pueden legar a ser mejores que 0.4 micras (16 μ-in). Algunos procesos abrasivos pueden lograr mejores acabados aún.

Por otro lado, existen ciertas desventajas asociadas con el maquinado y otros procesos de remoción de material:

- ***Desperdicio de material***. El maquinado es inherentemente un desperdicio de material. La viruta que se genera en la operación de maquinado es material de desperdicio. Aunque, en general, esta viruta puede reciclarse, en términos de la operación unitaria, el material que se remueve significa desperdicio.
- ***Consumo de tiempo***. Una operación de maquinado, en general, toma más tiempo en formar una pieza determinada que los procesos de formado alternos como el fundido o el forjado.

Debido a sus características, el maquinado se realiza generalmente después de otros procesos de manufactura, como fundición o deformación volumétrica (por ejemplo, forjado y estirado de barras). Otros procesos crean la forma general de la pieza y el maquinado produce la forma final, las dimensiones y el acabado.

21.1 PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA DEL MAQUINADO

El maquinado no es solamente un proceso, sino una familia de procesos. La característica común es el uso de una herramienta de corte que forma una viruta, la cual se remueve de la pieza de trabajo. Para realizar la operación, se requiere movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. Este movimiento relativo se logra en la mayoría de las operaciones de maquinado por medio de un movimiento primario, llamado la ***velocidad de corte***, y un movimiento secundario, denominado el ***avance***. La forma de la herramienta y su penetración en la superficie del trabajo, combinada con estos movimientos, produce la forma deseada de la superficie resultante del trabajo.

Tipos de operaciones de maquinado Hay muchas clases de operaciones de maquinado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta configuración geométrica y textura superficial. Se analizarán estas operaciones detalladamente en el capítulo 22; sin embargo, por ahora es apropiado identificar y definir los tres tipos más comunes: torneado, taladrado y fresado, que se ilustran en la figura 21.3.

En el ***torneado*** se usa una herramienta de corte con un borde cortante simple destinado a remover material de una pieza de trabajo giratoria para dar forma a un cilindro, como se ilustra en la figura 21.3*a*). El movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la pieza de trabajo giratoria y el movimiento de avance lo realiza la herramienta de corte, moviéndose lentamente en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo. El ***taladrado*** se usa para crear un agujero redondo. Esto se realiza generalmente con una herramienta giratoria que tiene dos filos cortantes. La herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación dentro de la pieza de trabajo para formar el agujero redondo, como se

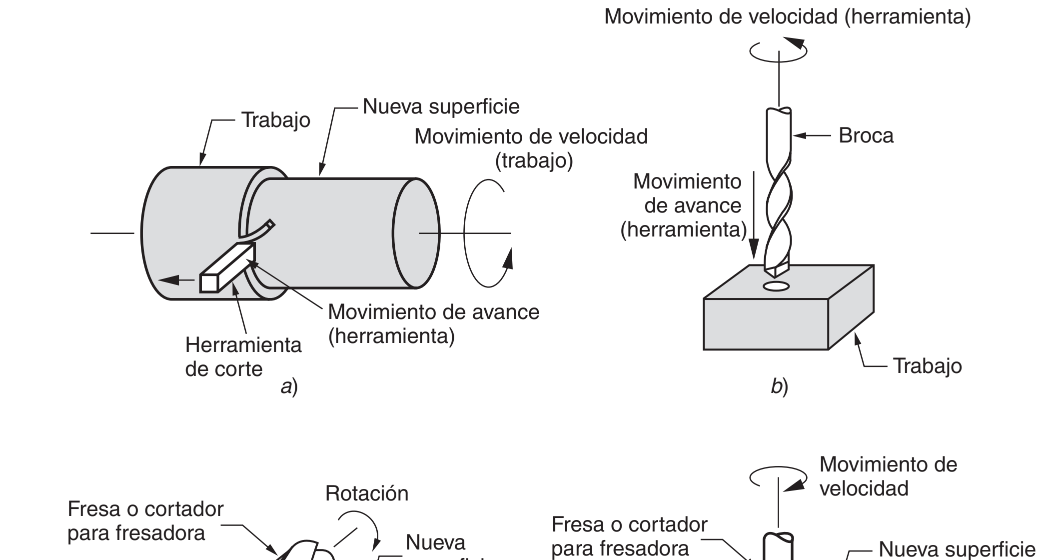


FIGURA 21.3 Los tres procesos más comunes de maquinado: *a*) torneado, *b*) taladrado y dos formas de fresado: *c*) fresado periférico y *d*) fresado de frente.

ilustra en la figura 21.3*b*). En el ***fresado***, una herramienta rotatoria con múltiples filos cortantes se mueve lentamente sobre el material para generar un plano o superficie recta. La dirección del movimiento de avance es perpendicular al eje de rotación. El movimiento de velocidad lo proporciona la fresa rotatoria. Hay varias formas de fresado; las dos básicas son el fresado periférico y el fresado de frente, como se muestra en la figura 21.3*c*) y *d*).

Otras operaciones convencionales del maquilado son perfilado, cepillado, escariado y aserrado (sección 22.5). Asimismo, el esmerilado y operaciones abrasivas similares se incluyen con frecuencia en la categoría del maquinado. Estos procesos por lo común siguen las operaciones de maquinado convencional y se utilizan para lograr acabados superficiales superiores de la pieza de trabajo.

La herramienta de corte Una herramienta de corte tiene uno o más filos cortantes y está hecha de un material que es más duro que el material de trabajo. El filo cortante sirve para separar una viruta del material de trabajo, como se muestra en la figura 21.2. Ligadas al filo cortante hay dos superficies de la herramienta: la cara inclinada y el flanco o superficie de incidencia. La cara inclinada que dirige el flujo de la viruta resultante se orienta en cierto ángulo, llamado ***ángulo de inclinación*** α. El ángulo se mide respecto a un plano perpendicular a la superficie de trabajo. El ángulo de inclinación puede ser positivo, como en la figura 21.2*a*), o negativo, como en el inciso *b*). El flanco de la herramienta provee un claro entre la herramienta y la superficie del trabajo recién generada; de esta forma protege a la superficie de la abrasión que pudiera degradar el acabado. Esta superficie del flanco o de incidencia se orienta en un ángulo llamado **ángulo de incidencia o de relieve**.

En la práctica, la mayoría de las herramientas de corte tiene formas más complejas que las de la figura 21.2. Hay dos tipos básicos cuyos ejemplos se ilustran en la figura 21.4: *a*) herramientas de una sola punta y *b*) herramientas de múltiples filos cortantes. Una ***herramienta de una sola punta*** tiene un filo cortante y se usa para operaciones como el torneado. Además de las características de la herramienta que se muestran en la figura 21.2, hay una punta en la herramienta de la cual deriva su nombre la herramienta cortante. Durante el maquinado la punta de la herramienta penetra bajo la superficie original del trabajo. La punta está generalmente redondeada en cierto radio llamado el radio de la nariz.

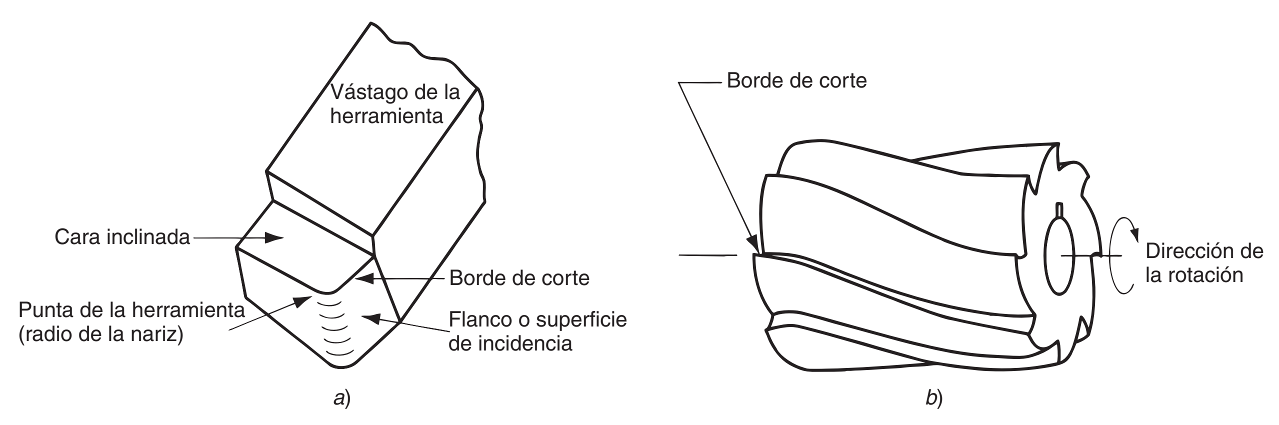


FIGURA 21.4 *a)* Una herramienta de una sola punta, que muestra la cara inclinada, el flanco y la punta, y *b)* una fresa helicoidal, representativa de las herramientas con bordes cortantes múltiples.

Las herramientas de múltiples filos cortantes tienen más de un borde de corte y generalmente realizan su movimiento respecto a la pieza de trabajo mediante rotación. El taladrado y el fresado usan herramientas rotatorias de múltiples filos cortantes. La figura 21.4*b*) muestra un cortador de fresado helicoidal utilizado en fresado periférico. Aunque la forma es bastante diferente de la herramienta de punta simple, muchos de los elementos de la forma son similares. Las herramientas de una sola punta y de múltiples filos cortantes y los materiales utilizados en ellos se estudian con más detalle en el capítulo 23.

Condiciones de corte Para realizar una operación de maquinado se requiere el movimiento relativo de la herramienta y el trabajo. El movimiento primario se realiza a una cierta ***velocidad de corte*** v. Además, la herramienta debe moverse lateralmente a través del trabajo. Éste es un movimiento mucho más lento, llamado el ***avance*** f. La dimensión restante del corte es la penetración de la herramienta de corte dentro de la superficie original del trabajo, llamada ***profundidad de corte*** d. Al conjunto de velocidad, avance y profundidad de corte se le llama ***condiciones de corte***. Éstas son las tres dimensiones del proceso de maquinado y, en ciertas operaciones (por ejemplo, la mayoría de las operaciones con herramientas de una punta), se puede usar su producto matemático para obtener la velocidad de remoción de material del proceso:

$$R_{MR} = vfd \tag{21.1}$$

donde R_{MR} = tasa de remoción de material, mm^3/s (in^3/min); v = velocidad de corte, m/s (ft/min), la cual debe convertirse a mm/s (in/min), f = avance, mm (in); y d = profundidad de corte, mm (in).

Las condiciones de corte para una operación de torneado se describen en la figura 21.5. Las unidades típicas usadas para la velocidad de corte son m/s (ft/min). El avance en torneado se expresa usualmente en mm/rev (in/rev) y la profundidad de corte se expresa en mm (in). En otras operaciones de maquinado, estas unidades pueden ser diferentes. Por ejemplo, en la operación de taladrado la profundidad se interpreta normalmente como la profundidad del agujero taladrado.

Las operaciones de maquinado se dividen normalmente en dos categorías, distinguidas por el propósito y las condiciones de corte: cortes para desbaste primario (burdo) y cortes de acabado. Los cortes para ***desbaste primario*** se usan para remover grandes cantidades de material de la pieza de trabajo inicial tan rápido como sea posible a fin de producir una forma cercana a la requerida, pero dejando algún material en la pieza para una operación posterior de acabado. Los cortes de ***acabado*** se usan para completar la pieza y alcanzar las dimensiones finales, las tolerancias y el acabado de la superficie. En los trabajos de maquinado para producción se realizan uno o más cortes para desbaste, seguidos de uno o más cortes de acabado. Las operaciones para desbaste se realizan a altas velocidades y profundidades; algunos de los avances típicos van de 0.4-1.25 mm/rev (0.015-0.050 in/rev) y profundidades típicas de 2.5-20 mm (0.100-0.750 in). Las operaciones de acabado se realizan a

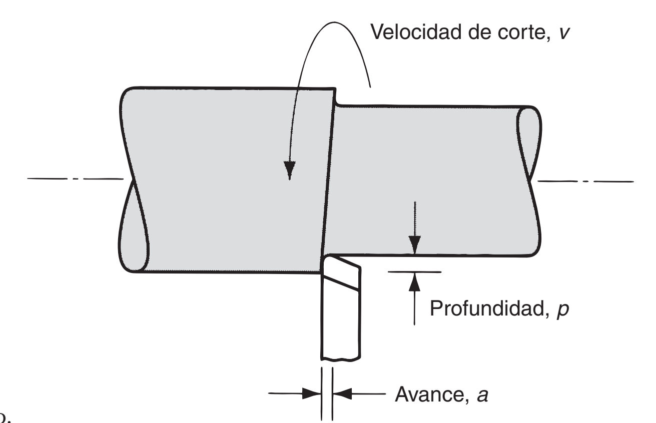


FIGURA 21.5 Velocidad de corte, avance y profundidad de corte de una operación de torneado.

bajas velocidades de avance y a bajas profundidades; avances de 0.125-0.4 mm (0.005-0.015 in/rev) y profundidades de 0.75-2.0 mm (0.030-0.075 in) son típicas. Las velocidades de corte son más bajas en el trabajo de desbaste que en el de acabado.

Para enfriar o lubricar la herramienta de corte se aplica frecuentemente un ***fluido de corte*** en la operación de maquinado (los fluidos de corte se estudian en la sección 23.4). La determinación de usar o no un fluido de corte y, en caso afirmativo, la elección del fluido apropiado se incluyen generalmente dentro del panorama de las condiciones de corte. La selección de estas condiciones, junto con el material de trabajo y las herramientas, determina el éxito de una operación de maquinado.

Máquinas herramienta Se usa una máquina herramienta para sostener la pieza de trabajo, poner en posición la herramienta respecto al trabajo y proporcionar la potencia para el proceso de maquinado a la velocidad, avance y profundidad que se han establecido. El control de la herramienta, de las condiciones de corte, del trabajo y de la máquina herramienta permite fabricar piezas con gran precisión y repetitividad a tolerancias de 0.025 mm (0.001 in) o mejores. El término ***máquina herramienta*** se aplica a cualquier máquina accionada por fuerza motriz que realice operaciones de maquinado, incluso el esmerilado. El término se aplica también frecuentemente a máquinas que realizan operaciones de formado de metal y prensado (capítulos 19 y 20).

Las máquinas herramientas usadas tradicionalmente para realizar el torneado, taladrado y fresado son los tornos, prensas taladradoras y máquinas fresadoras, respectivamente. Las máquinas herramienta convencionales las maneja usualmente un trabajador, quien carga y descarga las piezas de trabajo, cambia las herramientas de corte y establece las condiciones de corte. Muchas de las máquinas herramienta modernas están frecuentemente diseñadas para realizar sus procesos con un alto grado de automatización, conocido como control numérico por computadora (sección 38.1).

21.2 TEORÍA DE LA FORMACIÓN DE VIRUTA EN EL MAQUINADO DE METALES

La forma de la mayoría de las operaciones de maquinado práctico son algo complejas. Se dispone de un modelo simplificado del maquinado que desprecia muchas de las complejidades geométricas y describe la mecánica de los procesos con buena precisión; se llama modelo de corte ***ortogonal***, figura 21.6. Aun cuando un proceso real de maquinado es tridimensional, el modelo ortogonal tiene solamente dos dimensiones que juegan un papel activo en el análisis.

21.2.1 Modelo de corte ortogonal

El corte ortogonal usa por definición una herramienta en forma de cuña, en la cual el borde cortante es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte. Al presionar la herramienta

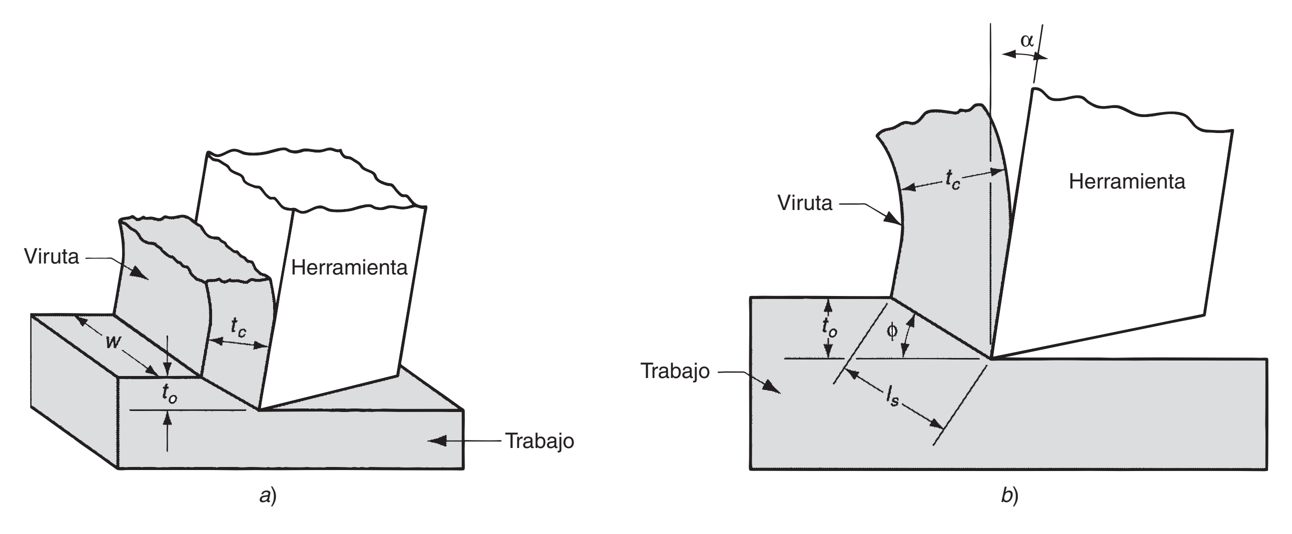


FIGURA 21.6 Corte ortogonal: *a*) como un proceso tridimensional y *b*) tal como se reduce a dos dimensiones en una vista lateral.

contra el material se forma una viruta por deformación cortante a lo largo de un plano llamado ***plano de corte***; éste forma un ángulo α con la superficie de trabajo. Solamente el borde afilado de corte de la herramienta hace que ocurra la falla del material; como resultado, la viruta se separa del material original. El material se deforma plásticamente a lo largo del plano de corte, donde el grueso de la energía mecánica se consume en el maquinado.

La herramienta para corte ortogonal tiene solamente dos elementos geométricos: 1) el ángulo de inclinación y 2) el ángulo del claro o de incidencia. Como se indicó previamente, el ángulo de inclinación α determina la dirección en la que fluye la viruta formada en la pieza de trabajo, y el ángulo del claro provee un claro pequeño entre el flanco de la herramienta y la superficie de trabajo recién generada.

Durante el corte, el borde cortante de la herramienta se coloca a cierta distancia por debajo de la superficie original del trabajo. Ésta corresponde al espesor de la viruta antes de su formación t_o. Al formarse la viruta a lo largo del plano de corte, incrementa su espesor a t_c. La relación de t_o a t_c se llama ***relación del grueso de la viruta*** (o simplemente ***relación de viruta) r.***

$$r = \frac{t_o}{t_c} \tag{21.2}$$

Como el espesor de la viruta después del corte siempre es mayor que el espesor correspondiente antes del corte, la relación de viruta siempre será menor a 1.0.

Además de t_o, el corte ortogonal tiene una dimensión de anchura w, como se muestra en la figura 21.6*a*), aun cuando esta dimensión no contribuya mucho al análisis en el corte ortogonal.

La forma del modelo de corte ortogonal permite establecer una relación importante entre el espesor de la viruta, el ángulo de inclinación y el ángulo del plano de corte. Sea l_s la longitud del plano de corte; se puede hacer la sustitución $t_o = l_s \operatorname{sen} \phi$ y $t_c = l_s \cos(\phi - \alpha)$. Entonces:

$$r = \frac{l_s \operatorname{sen} \phi}{l_s \cos(\phi - \alpha)} = \frac{\operatorname{sen} \phi}{\cos(\phi - \alpha)}$$

Lo anterior puede agruparse a fin de determinar el valor de ϕ:

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \operatorname{sen} \alpha} \tag{21.3}$$

La deformación cortante que ocurre a lo largo del plano de corte puede estimarse al examinar la figura 21.7. El inciso *a*) de la figura muestra la deformación cortante aproxima-

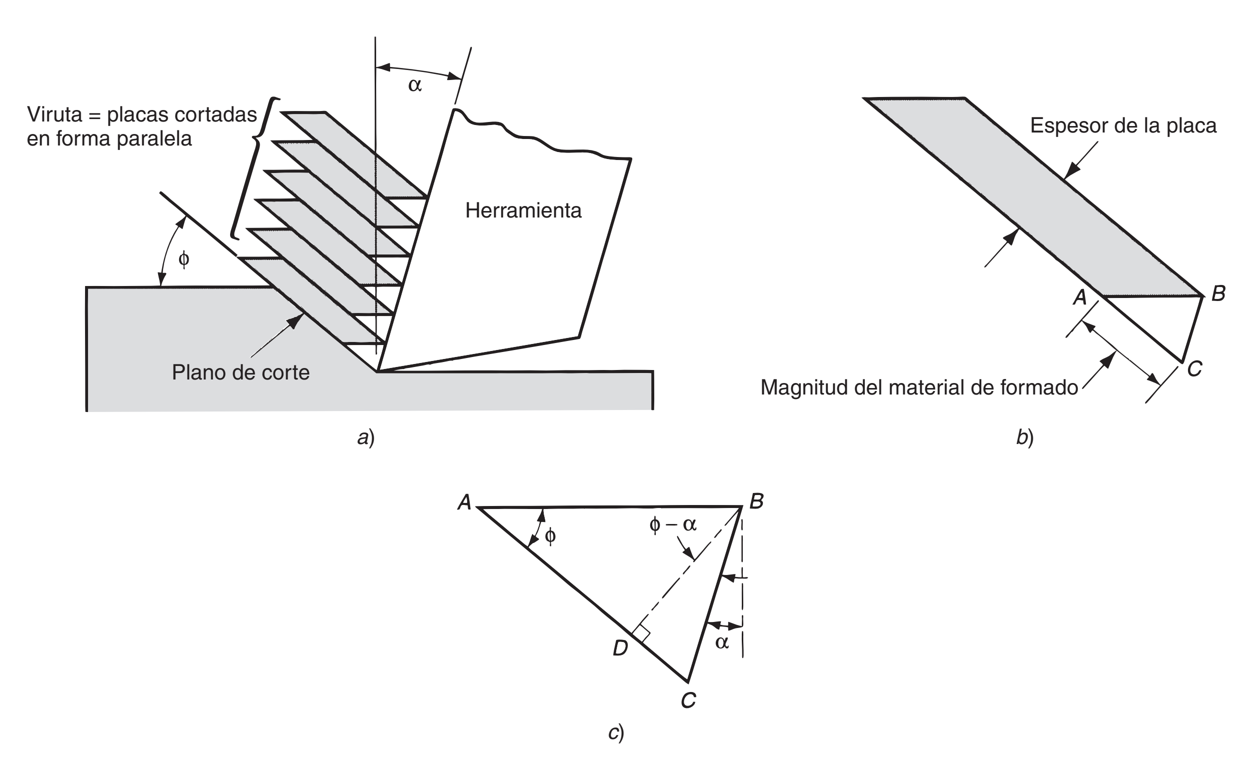


FIGURA 21.7 Deformación cortante durante la formación de viruta: *a*) formación de viruta representada como una serie de placas deslizándose una respecto a la otra *b*) una placa aislada para ilustrar la definición de la deformación cortante basada en este modelo de placa paralela y *c*) triángulo de deformación cortante usado para deducir la ecuación 21.4.

da, en la que una serie de placas paralelas se deslizan una contra otra para formar la viruta. De acuerdo con la definición de deformación cortante (sección 3.1.4), cada placa experimenta la deformación cortante mostrada en la figura 21.7b. Si se relaciona con el inciso c, esto se puede expresar como

$$\gamma = \frac{AC}{BD} = \frac{AD + DC}{BD}$$

la cual puede reducirse a la siguiente definición de deformación cortante para corte de metales:

$$\gamma = \tan(\phi - \alpha) + \cot \phi \tag{21.4}$$

EJEMPLO 21.1
Corte ortogonal

En una operación de maquinado que se aproxima al corte ortogonal, la herramienta de corte tiene un ángulo de inclinación = 10º. El espesor de la viruta antes del corte t_o = 0.50 mm y el espesor de la viruta después del corte t_c = 1.125 in. Calcule el plano de corte y la deformación cortante en la operación.

Solución: La relación de espesor de la viruta puede determinarse de la ecuación 21.2:

$$r = \frac{0.50}{1.25} = 0.444$$

El ángulo del plano de corte está dado por la ecuación 21.3:

$$\tan\phi = \frac{0.444 \cos 10}{1 - 0.444 \text{ sen } 10} = 0.4738$$

$$\phi = 25.4$$

Por último, la deformación cortante se calcula de la ecuación 21.4:

$$\gamma = \tan(25.4 - 10) + \cot 25.4$$

$$\gamma = 0.275 + 2.111 = 2.386$$

21.2.2 Formación real de la viruta

Se debe observar que hay diferencias entre el modelo ortogonal y el proceso de maquinado real. En primer lugar, el proceso de deformación cortante no ocurre a lo largo de un plano, sino dentro de una zona. Si el corte tuviera lugar a través de un plano de espesor cero, ello implicaría que la acción de corte debería ocurrir instantáneamente al pasar a través de un plano, en lugar de hacerlo en un periodo de tiempo finito (aunque breve). Para el material que se comporta en forma real, la deformación cortante debe ocurrir dentro de una zona delgada de corte. Éste es el modelo más realista del proceso de deformación al corte en maquinado y se ilustra en la figura 21.8. Los experimentos de corte de metal han demostrado que el espesor de la zona de corte es solamente de pocas milésimas de pulgada. Como la zona de corte es tan delgada, en la mayoría de los casos no hay mucha pérdida de precisión si se supone como un plano.

En segundo lugar, además de la deformación al corte que ocurre en la zona de corte, se presenta otra acción de corte en la viruta después de haber sido formada. Este corte adicional se conoce como corte secundario, para distinguirlo del corte primario. El corte secundario resulta de la fricción entre la viruta y la herramienta al deslizarse a lo largo de la cara inclinada de la herramienta. Su defecto aumenta con el incremento de la fricción entre la herramienta y la viruta. Las zonas de corte primario y secundario se pueden ver en la figura 21.8.

En tercer lugar, la formación de la viruta depende del tipo de material que se maquina y de las condiciones de corte de la operación. Se pueden distinguir cuatro tipos básicos de viruta, los cuales se ilustran en la figura 21.9:

a) **Viruta discontinua** Cuando se maquinan materiales relativamente frágiles (por ejemplo, hierro fundido) a bajas velocidades de corte, la viruta se forma frecuentemente en segmentos separados (a veces los segmentos están unidos sin cohesión). Esto tiende a impartir una textura irregular a la superficie maquinada. Una alta fricción herramienta-viruta y los avances y profundidades grandes de corte promueven la formación de este tipo de viruta.

b) ***Viruta continua*** Cuando se cortan materiales de trabajo dúctiles a velocidades altas con avances y profundidades pequeños, se forman virutas largas y continuas. Cuando se forma este tipo de viruta se obtiene un buen acabado de la superficie. Un borde cortante bien afilado en la herramienta y una baja fricción herramienta-viruta propician

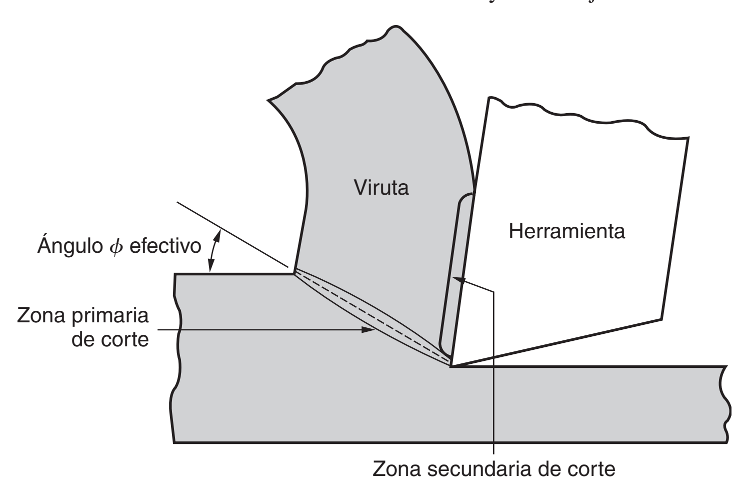


FIGURA 21.8 Visión más realista de la formación de viruta, en la que se muestra la zona de corte más que el plano de corte. También se muestra la zona secundaria de corte como resultado de la fricción herramienta-viruta.

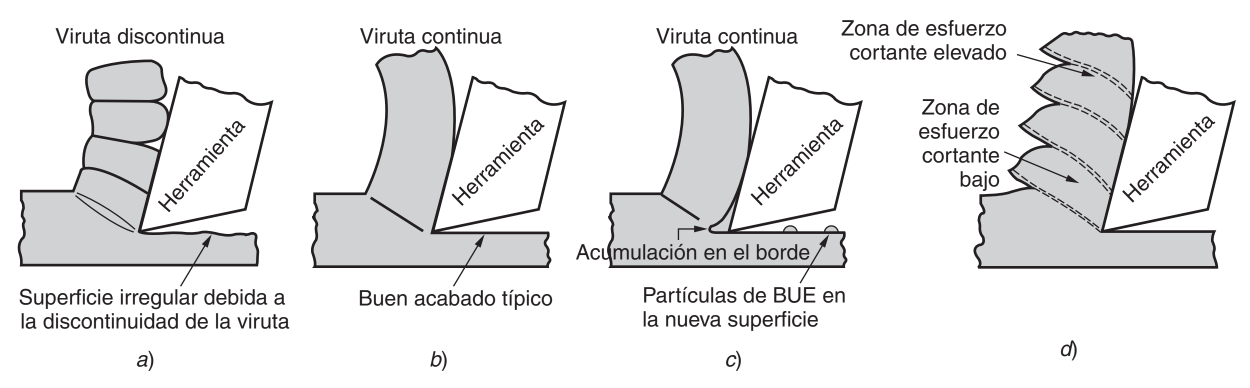


FIGURA 21.9 Cuatro tipos de formación de viruta en el corte de metales: *a*) discontinua, *b*) continua, *c*) continua con acumulación en el borde y *d*) dentada.

la formación de virutas continuas. Virutas continuas y largas (como en el torneado) pueden generar problemas respecto al desecho de viruta o enredarse alrededor de la herramienta. Para solucionar estos problemas, las herramientas de torneado a menudo están equipadas con separadores de viruta (sección 2.3.3.1).

c) ***Viruta continua con acumulación en el borde.*** Cuando se maquinan materiales dúctiles a velocidades bajas o medias de corte, la fricción entre la herramienta y la viruta tiende a causar la adhesión de porciones de material de trabajo en la cara inclinada de la herramienta cerca del filo cortante. Esta formación se llama acumulación en el borde (BUE). La formación de BUE es de naturaleza cíclica; se forma y crece, luego se vuelve inestable y se rompe. Gran parte de la acumulación de BUE se la lleva la viruta, a veces llevándose porciones de la cara inclinada de la herramienta con ella, lo cual reduce el tiempo de vida útil de la herramienta de corte. Sin embargo, algunas porciones del BUE pueden incorporarse a la superficie de trabajo recién formada, ocasionando que la superficie se vuelva rugosa.

Los tipos de viruta anteriormente mencionados originalmente los clasificó Ernst a finales de la década de 1930 [12]. Desde entonces, los metales disponibles utilizados en maquinado, herramientas de corte y velocidades de corte han aumentado y se puede identificar un cuarto tipo:

d) ***Viruta dentada*** (el término ***corte localizado*** se utiliza también para este cuarto tipo de viruta). Estas virutas son semicontinuas en el sentido de que poseen una apariencia de diente de sierra que se produce por una formación cíclica de viruta de alta resistencia alternativa al corte seguida de una baja resistencia al corte. Este cuarto tipo de viruta está asociado más cercanamente con ciertos metales difíciles de maquinar, tales como las aleaciones de titanio, superaleaciones a base de níquel y aceros inoxidables austénicos cuando se maquinan a velocidad de corte elevadas. Sin embargo, dicho fenómeno también sucede en metales de trabajo comunes (por ejemplo, aceros) cuando éstos se cortan a altas velocidades [12].[1]

21.3 RELACIONES DE FUERZA Y LA ECUACIÓN DE MERCHANT

Se puede definir varias fuerzas respecto al modelo de corte ortogonal. Con base en estas fuerzas, se puede definir el esfuerzo cortante, el coeficiente de fricción y algunas otras relaciones.

[1]Una descripción más completa del tipo de viruta dentada puede encontrarse en Trent & Wright [12], pp. 348-367.

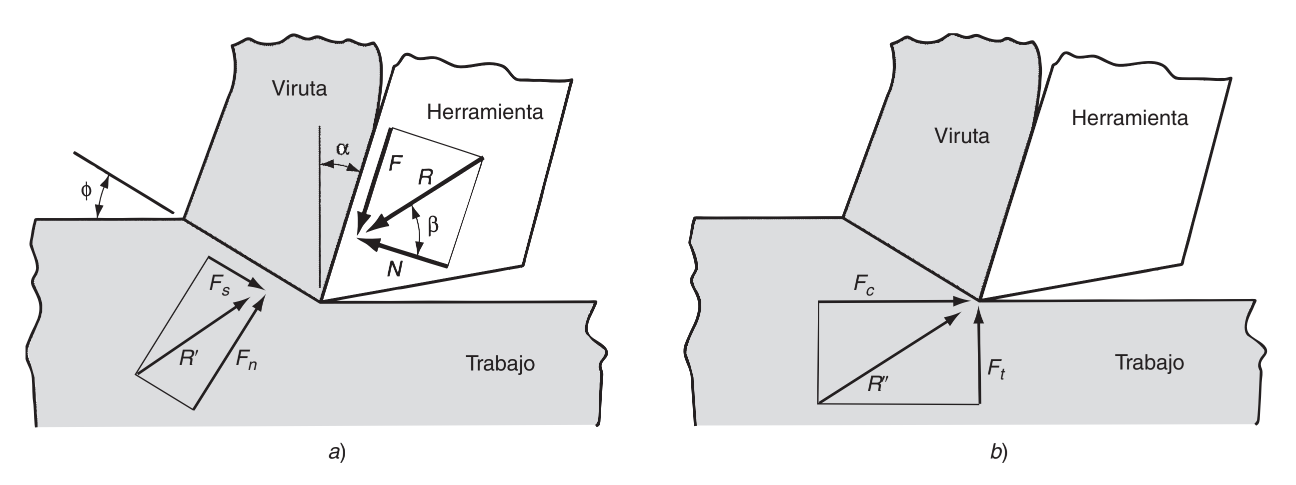


FIGURA 21.10 Fuerzas en el corte de metales: *a*) fuerzas que actúan sobre la viruta en el corte ortogonal y *b*) fuerzas que actúan sobre la herramienta y pueden medirse.

21.3.1 Fuerzas en el corte de metales

Considere las fuerzas que actúan en la viruta durante el corte ortogonal que se muestra en la figura 21.10a. Las fuerzas que la herramienta aplica contra la viruta se pueden separar en dos componentes mutuamente perpendiculares: fuerza de fricción y fuerza normal a la fricción. La ***fuerza de fricción*** F es la que resiste el flujo de la viruta a lo largo de la cara inclinada de la herramienta. La ***fuerza normal a la fricción***, N, es perpendicular a la fuerza de fricción. Estos dos componentes se pueden utilizar para definir el coeficiente de fricción μ entre la herramienta y la viruta:

$$\mu = \frac{F}{N} \tag{21.5}$$

La fuerza de fricción y su fuerza normal se pueden sumar vectorialmente para formar una fuerza resultante R, la cual se orienta en un ángulo β, llamado ángulo de fricción. El ángulo de fricción se relaciona con el coeficiente de fricción de la manera siguiente:

$$\mu = \tan \beta \tag{21.6}$$

Además de las fuerzas de la herramienta que actúan sobre la viruta, el trabajo impone dos componentes de fuerza sobre la viruta: la fuerza cortante y la fuerza normal a la cortante. La ***fuerza cortante*** F_s es la fuerza que causa la deformación de corte que ocurre en el plano de corte, y la ***fuerza normal a la cortante***, F_n es normal a la fuerza cortante. Con base en la fuerza cortante se puede definir el esfuerzo cortante que actúa a lo largo del plano de corte entre el trabajo y la viruta:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \tag{21.7}$$

donde A_s = área del plano de corte. Ésta se puede calcular como:

$$A_s = \frac{t_o w}{\text{sen}\ \phi} \tag{21.8}$$

El esfuerzo cortante determinado por la ecuación 21.7 representa el nivel de esfuerzo requerido para realizar las operaciones de maquinado. Por lo tanto, este esfuerzo es igual a la resistencia cortante del material de trabajo ($\tau = S$) bajo las condiciones en las que ocurre el corte.

La suma vectorial de las dos fuerzas componentes F_s y F_n da por resultado la fuerza resultante R'. Para que las fuerzas que actúan sobre la viruta estén balanceadas, la resultante R' debe ser igual en magnitud, pero en dirección opuesta y colineal con la resultante R.

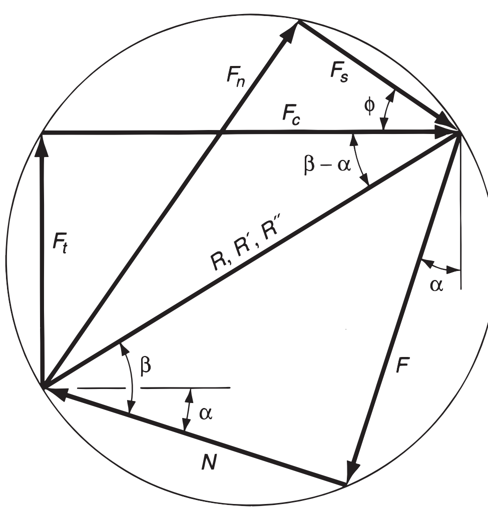


FIGURA 21.11 Diagrama de fuerzas en el que se muestran las relaciones geométricas entre F, N, F_S, F_n, F_C y F_t.

Ninguna de las cuatro fuerzas componentes F, N, F_s y F_n puede medirse directamente en una operación de maquinado, ya que las direcciones en las que están aplicadas varían en función a las diferentes formas de la herramienta y a las condiciones de corte. Sin embargo, es posible instrumentar en la herramienta de corte un dispositivo medidor de fuerzas llamado dinamómetro, de manera que se puedan medir directamente dos fuerzas componentes adicionales: fuerza de corte y fuerza de empuje. Estos dos componentes actúan sobre la herramienta: La ***fuerza de corte*** F_c que va en la dirección del corte, la misma dirección de la velocidad de corte v, y la **fuerza de empuje** F_t, es perpendicular a la fuerza de corte y está asociada con el espesor de la viruta antes del corte, t_o. La fuerza de corte y la fuerza de empuje se muestran en la figura 21.10*b*) junto con la fuerza resultante R''. Las direcciones respectivas de estas fuerzas son conocidas, así que los transductores de fuerza en el dinamómetro pueden alinearse en concordancia.

Se puede deducir ecuaciones para relacionar las cuatro fuerzas componentes que no pueden medirse con las dos fuerzas que pueden medirse. Utilizando el diagrama de fuerzas de la figura 21.11, se puede deducir las relaciones trigonométricas siguientes:

$$F = F_c \text{ sen } \alpha + F_t \cos \alpha \tag{21.9}$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \text{ sen } \alpha \tag{21.10}$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \text{ sen } \phi \tag{21.11}$$

$$F_n = F_c \text{ sen } \phi + F_t \cos \phi \tag{21.12}$$

Si la fuerza de corte y la fuerza de empuje son conocidas, se puede usar estas cuatro ecuaciones para calcular estimaciones de la fuerza cortante, la fuerza de fricción y la fuerza normal a la de fricción, y con base en estos estimados se puede determinar el esfuerzo cortante y el coeficiente de fricción.

Se puede observar que en el caso especial del corte ortogonal, cuando el ángulo inclinado $\alpha = 0$, las ecuaciones 21.9 y 21.10 se reducen a $F = F_t$ y $N = F_c$, respectivamente. Entonces en este caso especial, la fuerza de fricción y su fuerza normal podrían ser medidas de manera directa por el dinamómetro.

EJEMPLO 21.2
Esfuerzo cortante en maquinado

En el ejemplo 21.1 suponga que la fuerza de corte y la fuerza de empuje se miden durante una operación de corte ortogonal con valores de F_c = 1 559 N y F_t = 1 271 N. El ancho de la operación de corte ortogonal es w = 3.0 mm. Con base en estos datos, determine la resistencia al corte del material de trabajo.

Solución: A partir del ejemplo 21.1, el ángulo inclinado $\alpha = 10°$ y el ángulo del plano de corte $\phi = 25.4°$. La fuerza cortante se puede calcular de la ecuación 21.11:

$$F_s = 1\,559 \cos 25.4 - 1\,271 \text{ sen } 25.4 = 863 \text{ N}$$

El área del plano de corte está determinada por la ecuación 21.8:

$$A_s = \frac{(0.5)(3.0)}{\text{sen } 25.4} = 3.497 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, el esfuerzo cortante que iguala la resistencia al corte del material de trabajo es:

$$\tau = S = \frac{863}{3.497} = 247 \text{ N/mm}^2 = 247 \text{ MPa}$$

Este ejemplo demuestra que la fuerza de corte y la fuerza de empuje están relacionadas con la resistencia al corte del material. Las relaciones se pueden establecer en una forma más directa. Al recordar que en la ecuación 21.7 la fuerza de corte $F_s = S\,A_s$, entonces el diagrama de fuerzas de la figura 21.11 se puede utilizar para deducir las ecuaciones siguientes:

$$F_c = \frac{St_o w \cos(\beta - \alpha)}{\text{sen } \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{F_s \cos(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (21.13)$$

y

$$F_t = \frac{St_o w \text{ sen}(\beta - \alpha)}{\text{sen } \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{F_s \text{ sen}(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (21.14)$$

Estas ecuaciones permiten estimar la fuerza de corte y las fuerzas de empuje en una operación de corte ortogonal, si se conoce la resistencia al corte del material de trabajo.

21.3.2 La ecuación de Merchant

Eugene Merchant dedujo una relación importante en el corte de metal [9]. La deducción está basada en la suposición de corte ortogonal, pero en su validez general se extiende a operaciones de maquinado en tres dimensiones. Merchant empezó con la definición de esfuerzo cortante, expresado mediante la siguiente relación deducida de la combinación de las ecuaciones 21.7, 21.8 y 21.11:

$$\tau = \frac{F_c \cos \phi - F_s \text{ sen } \phi}{(t_o w / \text{sen } \phi)} \quad (21.15)$$

Merchant pensó que entre los ángulos posibles que emanan del borde cortante de la herramienta donde puede ocurrir la deformación de corte, hay un ángulo ϕ que predomina. En este ángulo, el esfuerzo cortante es justamente igual a la resistencia al corte del material de trabajo, y por esta causa la deformación cortante ocurre en este ángulo. El esfuerzo cortante es menor que la resistencia al corte para todos los demás ángulos posibles, por tanto la formación de viruta no puede ocurrir en otros ángulos. En efecto, el material de trabajo seleccionará un ángulo del plano de corte que minimiza la energía. Dicho ángulo se puede determinar tomando la derivada del esfuerzo cortante S en la ecuación 21.15 respecto a ϕ, e igualando la derivada a cero. Despejando ϕ, se obtiene la relación llamada ecuación de Merchant:

$$\phi = 45 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (21.16)$$

Una de las suposiciones en que se basa la ecuación de Merchant es que la resistencia al corte del material de trabajo es una constante a la que no le afecta la velocidad de deformación, la temperatura y otros factores. Dado que estas suposiciones no corresponden a las operaciones prácticas de maquinado, la ecuación 21.16 debe considerarse más como

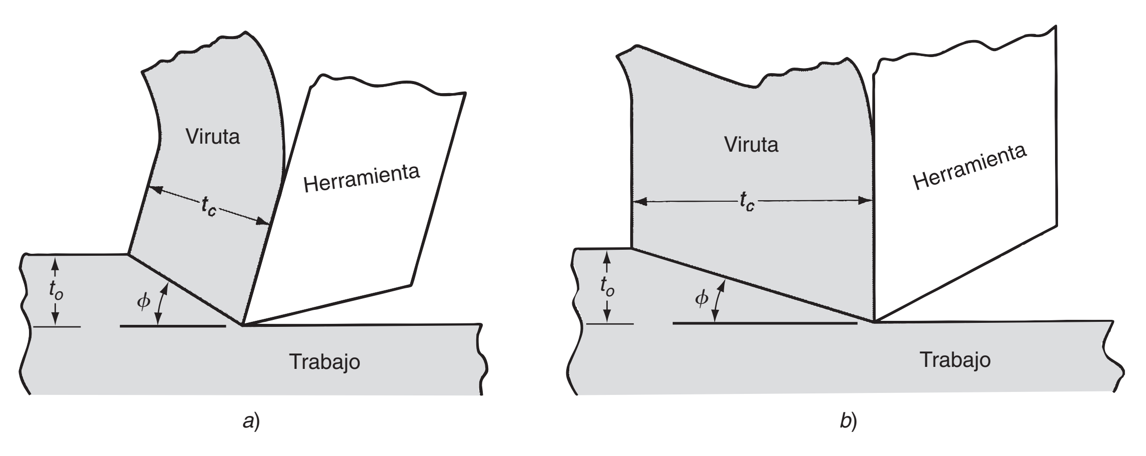


FIGURA 21.12 Efecto del ángulo del plano de corte ϕ; *a*) a mayor ϕ, resulta una menor área del plano de corte; *b*) a menor ϕ, corresponde una mayor área del plano de corte. Note que el ángulo de inclinación es mayor en *a*), lo cual tiende a incrementar el ángulo cortante de acuerdo con la ecuación de Merchant.

una relación aproximada entre sus términos que un enunciado matemático preciso. No obstante, se considera su aplicación en el ejemplo siguiente.

EJEMPLO 21.3 Estimación del ángulo de fricción

Con los datos y resultados de los ejemplos anteriores, calcule: *a*) el ángulo de fricción usando la ecuación de Merchant y *b*) el coeficiente de fricción.

Solución: *a*) Del ejemplo 21.1, $\alpha = 10°$ y $\phi = 25.4°$. Al reacomodar la ecuación 21.16, el ángulo de fricción se puede estimar como sigue:

$$\beta = 2(45) + 10 - 2(25.4) = 49.2°$$

b) El coeficiente de fricción está determinado por la ecuación 21.6:

$$\mu = \tan 49.2 = 1.16$$

■

Lecciones basadas en la ecuación de Merchant El valor real de la ecuación de Merchant radica en que define la relación general entre el ángulo de inclinación, la fricción herramienta-viruta y el ángulo del plano de corte. El ángulo del plano de corte puede incrementarse 1) aumentando el ángulo de inclinación y 2) disminuyendo el ángulo de fricción (o coeficiente de fricción) entre la herramienta y la viruta. El ángulo de inclinación puede incrementarse diseñando la herramienta adecuadamente y el ángulo de fricción puede reducirse utilizando un fluido lubricante de corte.

La importancia de incrementar el ángulo del plano de corte se puede apreciar en la figura 21.12. Si todos los otros factores permanecen constantes, un mayor ángulo del plano de corte significa una menor área de corte. Como la resistencia al corte se aplica a través de esta área, la fuerza de corte requerida para formar la viruta decrecerá cuando el área del plano de corte disminuya. Un ángulo más alto del plano de corte da como resultado energías y temperaturas de corte más bajas. Éstas son dos buenas razones para tratar de hacer el ángulo del plano de corte tan grande como sea posible durante el maquinado.

Aproximación al torneado por corte ortogonal El modelo ortogonal se puede usar para aproximar el torneado y algunas otras operaciones de maquinado con una punta, mientras el avance en estas operaciones sea menor respecto a la profundidad de corte. De esta manera la mayoría del corte tendrá lugar en la dirección del avance, y el corte en la nariz de la herramienta será despreciable. La figura 21.13 indica la conversión de una situación de corte a la otra.

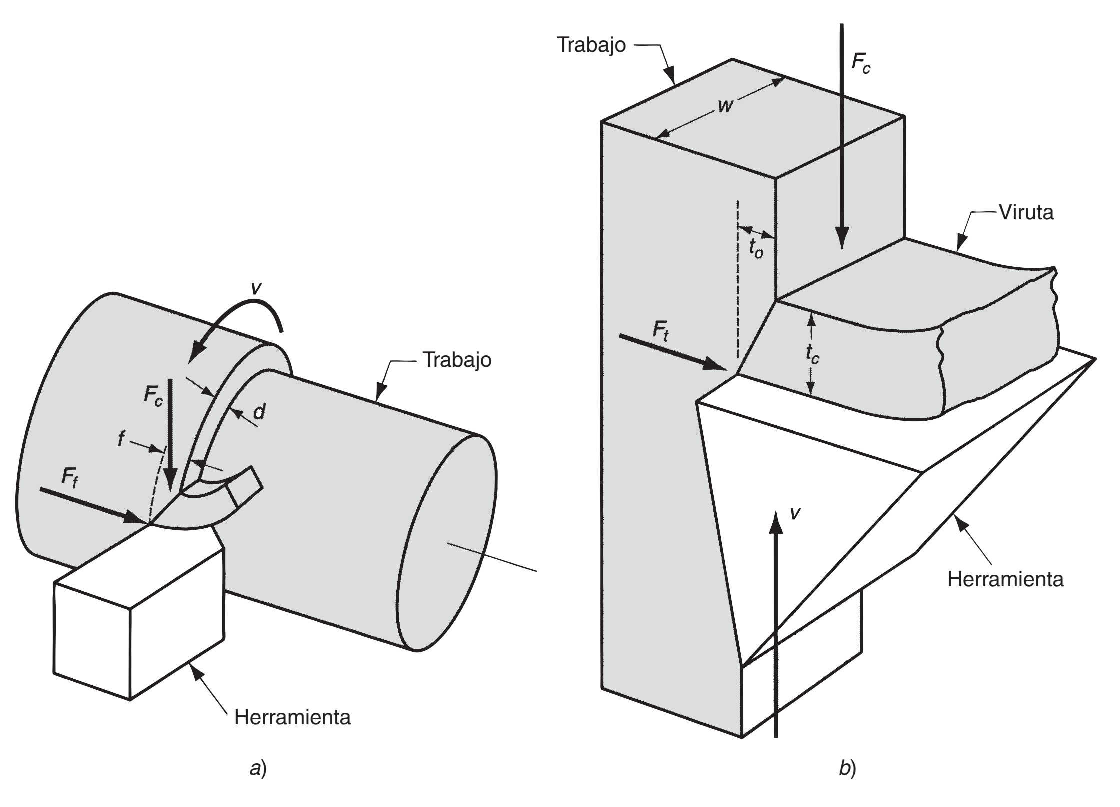


FIGURA 21.13 Aproximación del torneado por el modelo ortogonal: *a*) torneado y *b*) el corte ortogonal correspondiente.

TABLA 21.1 Clave de conversión: operación de torneado contra corte ortogonal.

Operación de torneado	Modelo de corte ortogonal
Avance f =	Espesor de la viruta antes del corte t_o
Profundidad d =	Ancho del corte w
Velocidad de corte v =	Velocidad de corte v
Fuerza de corte F_c =	Fuerza de corte F_c
Fuerza de avance F_f =	Fuerza de empuje F_t

La interpretación de las condiciones de corte es diferente en los dos casos. En el corte ortogonal, el espesor de la viruta antes del corte t_o corresponde al avance f en el torneado y el ancho de corte w corresponde a la profundidad de corte d en el torneado. Además, la fuerza de empuje F_t en el modelo ortogonal corresponde a la fuerza de avance F_f en torneado. La velocidad de corte y la fuerza de corte tienen la misma interpretación en los dos casos. La tabla 21.1 resume las conversiones.

21.4 RELACIONES ENTRE POTENCIA Y ENERGÍA EN EL MAQUINADO

Una operación de producción en maquinado requiere potencia. La fuerza de corte en una operación de maquinado puede exceder 1 000 N (algunos cientos de libras), como lo sugiere el ejemplo 21.2. Las velocidades típicas de corte son de varios cientos de metros

por minuto. El producto de la fuerza cortante y la velocidad dan la potencia (energía por unidad de tiempo) requerida para ejecutar la operación de maquinado:

$$P_c = F_c v \tag{21.17}$$

donde P_c = potencia de corte, N-m/s o W (ft-lb/min); F_c = fuerza de corte, N (lb); y v = velocidad de corte, m/s (ft/min). Las unidades en el sistema acostumbrado en Estados Unidos pueden convertirse a caballos de fuerza dividiendo ft-lb/min entre 33 000. De aquí que:

$$HP_c = \frac{F_c v}{33\,000} \tag{21.18}$$

donde, HP_c = potencia de corte en caballos de fuerza, hp. La potencia bruta requerida para operar la máquina herramienta es más grande que la potencia usada en el proceso de corte, debido a las pérdidas mecánicas en el motor y la transmisión de la máquina. Estas pérdidas se pueden contabilizar por la eficiencia mecánica de la máquina herramienta.

$$P_g = \frac{P_c}{E} \quad \text{o} \quad HP_g = \frac{HP_c}{E} \tag{21.19}$$

donde P_g = potencia bruta del motor de la máquina herramienta en W; HP_g = caballos de fuerza brutos; y E = eficiencia mecánica de la máquina herramienta. El valor típico de E para máquinas herramientas es de aproximadamente 90%.

Muchas veces es útil convertir la potencia en potencia por unidad de volumen de corte del metal. A ésta se le llama ***potencia unitaria***, P_u (o ***caballos de fuerza unitarios***, HP_u), y se define como:

$$P_u = \frac{P_c}{R_{MR}} \quad \text{o} \quad HP_u = \frac{HP_c}{R_{MR}} \tag{21.20}$$

donde R_{MR} = tasa de remoción del material, mm^3/s (in^3/min). La tasa de remoción de material se puede calcular como el producto de $vt_o w$. Ésta es la ecuación 21.1, usando las conversiones de la tabla 21.1. La potencia unitaria también se conoce como la ***energía específica***, U.

$$U = P_u = \frac{P_c}{R_{MR}} = \frac{F_c v}{v t_c w} = \frac{F_c}{t_o w} \tag{21.21}$$

Las unidades para la energía específica son típicamente N-m/mm^3 (in-lb/in^3). Sin embargo, la última expresión en la ecuación 21.21 sugiere que las unidades puedan reducirse a N-m/mm^3 o J/mm^3 (in-lb/in^3).

EJEMPLO 21.4 Relaciones de potencia en maquinado

Continuando con los ejemplos anteriores, se determinarán la potencia de corte y la energía específica requerida para desempeñar el proceso de maquinado si la velocidad de corte = 100 m/min. Al resumir los datos y los resultados de los ejemplos anteriores, t_o = 0.50 mm, w = 3.0 mm, F_C = 1 557 N.

Solución: A partir de la ecuación 21.18, la potencia de la operación es

P_c = (1557 N)(100m/mm) = 155.700 N-m/min = 155.700 J/min = 2 595 J/s = 2 595 W

La energía específica se calcula a partir de la ecuación 21.21:

$$U = \frac{155\,700}{100(10^3)(3.0)(0.5)} = \frac{155\,700}{150\,000} = 1.038 \text{ N-m/mm}^3$$

■

La potencia unitaria y la energía específica proporcionan una medida útil de cuánta potencia (o energía) se requiere para remover una pulgada cúbica de metal durante el maquinado. Utilizando dicha medida, es posible comparar los diferentes materiales de trabajo en términos de sus requerimientos de potencia y energía. La tabla 21.2 representa un listado de los valores de los caballos de fuerza unitarios y de la energía específica para algunos materiales de trabajo determinados.

TABLA 21.2 Valores de los caballos de fuerza unitarios y energía específica para materiales de trabajo seleccionados usando herramientas de corte afiladas, y espesor de la viruta antes del corte t_o = 0.25 mm (0.010 in).

Material	Dureza Brinell	Energía específica U o potencia unitaria P_u N-m/mm^3	in-lb/in^3	Caballos de fuerza unitaria en HP_u hp/(in^3/min)
Acero al carbono	150-200	1.6	240 000	0.6
	201-250	2.2	320 000	0.8
	251-300	2.8	400 000	1.0
Aceros aleados	200-250	2.2	320 000	0.8
	251-300	2.8	400 000	1.0
	301-350	3.6	520 000	1.3
	351-400	4.4	640 000	1.6
Hierros fundidos	125-175	1.1	160 000	0.4
	175-250	1.6	240 000	0.6
Acero inoxidable	150-250	2.8	400 000	1.0
Aluminio	50-100	0.7	100 000	0.25
Aleaciones de aluminio	100-150	0.8	120 000	0.3
Latón	100-150	2.2	320 000	0.8
Bronce	100-150	2.2	320 000	0.8
Aleaciones de magnesio	50-100	0.4	60 000	0.15

Datos recopilados de [5], [7], [10] y otras fuentes.

Los valores de la tabla 21.2 se basan en dos suposiciones: 1) la herramienta de corte está afilada y 2) el espesor de viruta antes del corte t_o = 0.25 mm (0.010 in). Si no se satisfacen estas suposiciones, se tiene que hacer algunos ajustes. En una herramienta desgastada la potencia requerida para desempeñar el corte es más grande, y esto se refleja en valores de caballos de fuerza unitarios y energía específica más grande. Como una guía aproximada, los valores en la tabla deben multiplicarse por un factor entre 1.00 y 1.25, dependiendo del grado de uso de la herramienta. Para herramientas afiladas el factor es 1.00. Para herramientas casi completamente usadas en operaciones de acabado el factor es alrededor de 1.10, y para herramientas casi completamente usadas en operaciones de desbaste primario el factor es de 1.25.

El espesor de la viruta antes del corte t_o afecta también los valores de los caballos de fuerza unitarios y de la energía específica. Al reducirse t_o, aumentan los requerimientos de la potencia unitaria. A esta relación se le llama algunas veces el ***efecto de tamaño***. Por ejemplo en el esmerilado, donde las virutas son extremadamente pequeñas en comparación con muchas otras operaciones de maquinado, se requieren valores muy altos de energía específica. Los valores de U y HP_u en la tabla 21.2 se pueden usar aun para estimar los caballos de fuerza unitarios y energía, en situaciones donde t_o no sea igual a 0.25 mm (0.010 in), mediante un factor de corrección que considere cualquier diferencia en el espesor de la viruta antes del corte. La figura 21.14 proporciona los valores de este factor de corrección en función a t_o. Los caballos de fuerza unitarios y la energía específica de la tabla 21.2 deben multiplicarse por el factor apropiado de corrección cuando t_o sea diferente a 0.25 mm (0.010 in).

Debe hacerse notar que, además del afilado de la herramienta y el efecto de tamaño, otros factores influyen también en los valores de los caballos de fuerza unitarios y de la energía específica para una operación dada. Estos otros factores incluyen el ángulo de inclinación, la velocidad de corte y el fluido de corte. Al aumentar el ángulo de inclinación o la velocidad de corte, o al añadir un fluido de corte, los valores de U y HP_u se reducen ligeramente. Para los efectos de este libro, en los ejercicios que se encuentran al final del capítulo se puede ignorar los efectos de estos factores adicionales.

La distribución de la energía de corte entre la herramienta, el trabajo y la viruta varían con la velocidad de corte, como se indica en la figura 21.15. A velocidades bajas, una porción significativa de la energía total se absorbe en la herramienta. Sin embargo, a velocidades más elevadas (y a niveles de energía más altos), el movimiento rápido de la viruta

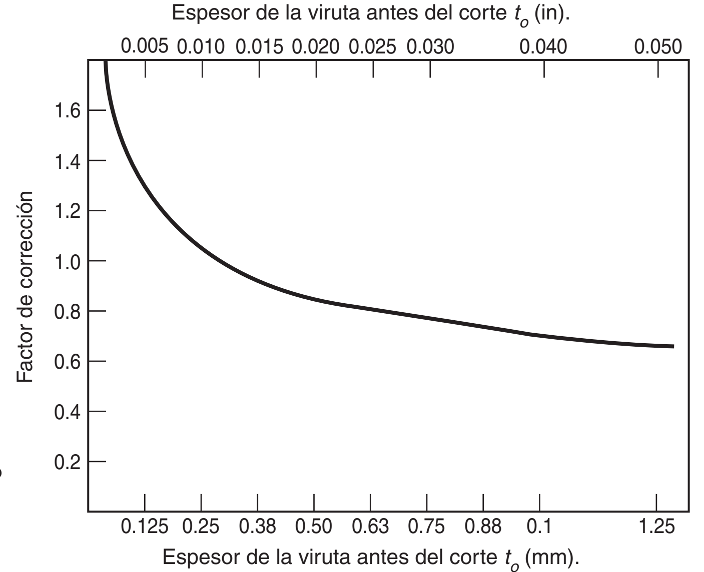


FIGURA 21.14 Factor de corrección para los caballos de fuerza unitarios en hp y la energía específica cuando los valores del espesor de la viruta antes del corte t_o son diferentes de 0.25 mm (0.010 in).

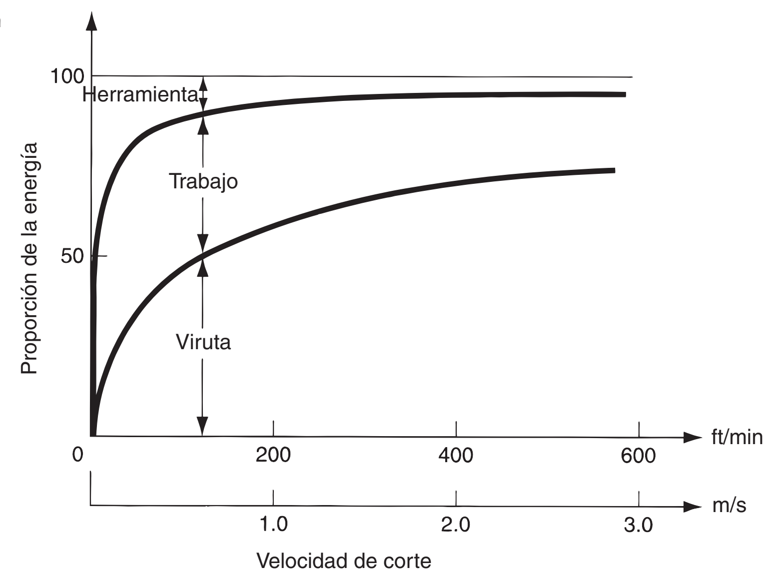


FIGURA 21.15 Distribución típica de la energía total de corte entre la herramienta, el trabajo y la viruta en función de la velocidad de corte. (Basada en datos de [8]).

a través de la cara inclinada de la herramienta ofrece menos oportunidad a que el calor generado en la zona primaria de corte sea conducido a través de la interfaz herramienta-viruta hacia la herramienta. De aquí que, la proporción de energía total absorbida por la herramienta se reduce y la mayor parte se la lleva la viruta.

21.5 TEMPERATURA DE CORTE

Casi toda la energía que se consume en el maquinado (aproximadamente 98%) es convertida en calor. Este calor puede hacer que las temperaturas sean muy altas en la interfaz herramienta-viruta; arriba de los 600 ºC (1 100 ºF) es muy común. La energía restante (alrededor de 2%) se retiene como energía elástica en la viruta.

Las temperaturas de corte son importantes debido a que las elevadas temperaturas 1) reducen la vida útil de la herramienta, 2) generan viruta caliente que representa grandes riesgos para el operador y 3) pueden producir imprecisiones en las dimensiones de la pieza de trabajo debidas a la expansión térmica del material de trabajo. En esta sección, se analizan los métodos para el cálculo y medición de temperatura en las operaciones de maquinado.

21.5.1 Métodos analíticos para el cálculo de la temperatura de corte

Existen varios métodos analíticos para estimar la temperatura de corte. Las referencias [1], [3], [8] y [14], presentan algunos de ellos. Se describe el método de Cook [3]. Este método se dedujo de un análisis dimensional, usando datos experimentales para varios materiales de trabajo a fin de establecer los valores de los parámetros de la ecuación resultante. La ecuación se puede usar para predecir la elevación de la temperatura en la interfaz herramienta-viruta durante el maquinado:

$$\Delta T = \frac{0.4U}{\rho C}\left(\frac{vt_o}{K}\right)^{0.333} \tag{21.22}$$

donde ΔT = aumento de la temperatura media en la interfaz herramienta-viruta, ºC (ºF); U = energía específica en la operación, N-m/mm^3 o J/mm^3 (in-lb/in^3); v = velocidad de corte, m/s (in/s); t_o = espesor de la viruta antes del corte, m (in); ρC = calor específico volumétrico del material de trabajo, J/mm^3-ºC (in-lb/in^3-ºF); K = difusividad térmica del material de trabajo, m^2/s (in^2/s).

EJEMPLO 21.5 Temperatura de corte

Para la energía específica obtenida en el ejemplo 21.4, calcule el incremento en la temperatura por encima de la temperatura ambiente de 20 ºC. Utilice los datos proporcionados en los ejemplos anteriores en este capítulo: v = 100 m/min, t_o = 0.50 mm. Además, el calor específico volumétrico para el material de trabajo = 3.0 (10^{-3}) J/mm^3-ºC y la difusividad térmica = 50(10^{-6}) m^2/s (= 50 mm^2/s).

Solución: La velocidad de corte debe convertirse a las unidades de mm/s: v = (100 m/min)(10^3 mm/m)/(60 s/min) = 1 667 mm/s. La ecuación 21.22 se puede usar ahora para calcular el aumento de la temperatura media:

$$\Delta T = \frac{0.4(1.038)}{3.0(10^3)}°C\left(\frac{1667(0.5)}{50}\right)^{0.333} = (138.4)(2.552) = 353°C$$

Al añadir esta temperatura al ambiente, la temperatura de corte resultante es 20 + 353 = 373 ºC.

21.5.2 Medición de la temperatura de corte

Se han creado métodos experimentales para la medición de temperaturas en maquinado. La técnica de medición más frecuentemente usada es el ***termopar herramienta-viruta***. Este termopar toma la herramienta y la viruta como dos metales diferentes que forman una junta de termopar. Al conectar apropiadamente las terminales eléctricas a la herramienta y a la pieza de trabajo (que está conectada a la viruta), se puede monitorear la diferencia de potencial generado por la interfaz herramienta-viruta durante el corte mediante un potenciómetro registrador u otro dispositivo de adquisición de datos apropiado. La salida de voltaje resultante del termopar herramienta-viruta (medido en mV) se puede convertir al valor de temperatura correspondiente mediante ecuaciones de calibración para la combinación particular herramienta-trabajo.

Los investigadores han utilizado el termopar herramienta-viruta para estudiar la relación entre la temperatura y las condiciones de corte como velocidad y avance. Trigger

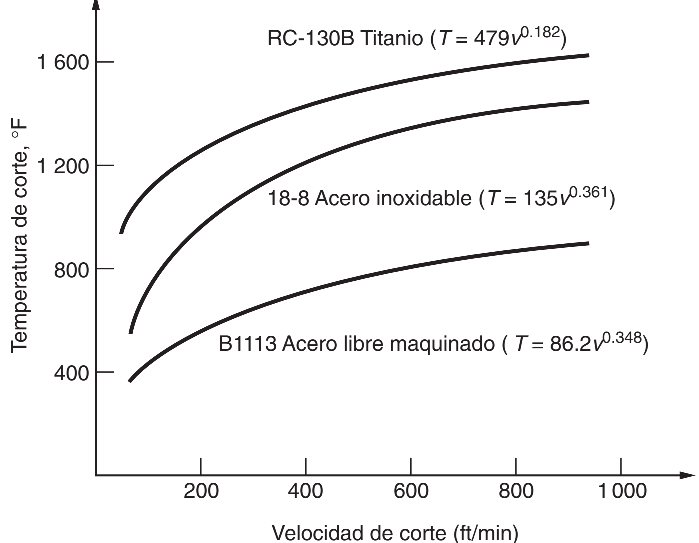


FIGURA 21.16 Temperaturas de corte medidas experimentalmente y graficadas contra la velocidad para tres materiales de trabajo; se muestra conformidad con la ecuación 21.23. (Basada en datos de [8]).[2]

[13] determinó la relación entre velocidad y temperatura y obtuvo la siguiente fórmula general:

$$T = K\, v^m \tag{21.23}$$

donde T = temperatura medida en la interfaz herramienta-viruta y v = velocidad de corte. Los parámetros K y m dependen de las condiciones de corte (diferentes a v) y del material de trabajo. En la figura 21.16 se muestran las gráficas de la temperatura contra la velocidad de corte para varios materiales de trabajo, con ecuaciones similares a la ecuación 21.23 determinadas para cada material. Existe una relación similar entre la temperatura de corte y el avance; sin embargo, el efecto del avance sobre la temperatura no es tan fuerte como la velocidad de corte. Los resultados empíricos tienden a apoyar la validez general de la ecuación de Cook, ecuación 21.22.

REFERENCIAS

[1] Boothroyd, G. y Knight, W.A., ***Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools,*** 2a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1989.

[2] Chao, B. T., y Trigger, K. J., "Temperature Distribution at the Tool-Chip Interface in Metal Cutting", ***ASME Transactions,*** vol. 77, octubre de 1955, pp. 1107-1121.

[3] Cook, N., "Tool Wear and Tool Life", ***ASME Transactions, J. Engrg. for Industry,*** Vol. 95, noviembre de 1973, pp. 931-938.

[4] DeGarmo, E.P., Black, J.T. y Kohser, R.A., ***Materials and Processes in Manufacturing,*** 9a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.

[5] Drozda, T.J. y Wick, C. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. I: ***Machining.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1983.

[6] Kalpakjian, S. y Schmid, R., ***Manufacturing Processes form Engineering Materials***, 4a. ed., Prentice Hall/Pearson, Upper Saddle River, N.J., 2003.

[7] Lindberg, R. A., ***Processes and Materials of Manufacture***, 4a. ed., Allyn and Bacon, Inc., Boston, Mass., 1990.

[8] Loewen, E. G. y Shaw, M. C., "On the Analysis of Cutting Tool Temperatures", ***ASME Transactions***, Vol. 76, núm. 2, febrero de 1954, pp. 217-225.

[9] Merchant, M. E., "Mechanics of the Metal Cutting Process: II. Plasticity Conditions on Orthogonal Cutting". ***Journal of applied Physics***, Vol. 16 junio de 1945, pp. 318-324.

[10] Schey, J. A., ***Introduction to Manufacturing Processes***, 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.

[2]Las unidades reportadas en el artículo ASME de Loewen y Shaw [8] fueron ºF para temperaturas de corte y ft/min para la velocidad de corte. Se ha conservado esas unidades en las gráficas y ecuaciones de la figura.

[11] Shaw, M.C., ***Metal Cutting Principles***, 2a. ed., Oxford University Press, Inc., Oxford, Inglaterra, 2005.
[12] Trent, E. M. y Wright, P. K., ***Metal Cutting***, 4a. ed., Butterworth Heinemann, Boston, Mass., 2000.
[13] Trigger, K. J., "Progress Report No. 2 on Tool-Chip Interface Temperatures", ***ASME Transactions***, Vol. 71, núm. 2, febrero de 1949, pp. 163-174.
[14] Trigger, K. J. y Chao, B. T., "An Analytical Evaluations of Metal Cutting Temperatures"., ***ASME Transactions.***, Vol. 73, núm. 1, enero de 1951, pp. 57-68.

PREGUNTAS DE REPASO

21.1. ¿Cuáles son las tres categorías básicas de procesos de remoción de material?
21.2. ¿En qué se distingue el maquinado de otros procesos de manufactura?
21.3. Identifique algunas de las razones por la que el maquinado es comercial y tecnológicamente importante.
21.4. Mencione los tres procesos de maquinado más comunes.
21.5. ¿Cuáles son las dos categorías básicas de herramientas de corte en maquinado? Dé dos ejemplos de operaciones de maquinado que use cada uno de los tipos de herramientas.
21.6. Identifique los parámetros de una operación de maquinado que se incluyen en el conjunto de las condiciones de corte.
21.7. Defina la diferencia entre las operaciones de desbaste primario y las de acabado en maquinado.
21.8. ¿Qué es una máquina herramienta?
21.9. ¿Qué es una operación de corte ortogonal?
21.10. ¿Por qué es útil el modelo de corte ortogonal en el análisis del maquinado metálico?
21.11. Mencione y describa brevemente los cuatro tipos de viruta que se producen en el corte de metales.
21.12. Identifique las cuatro fuerzas que actúan sobre la viruta en el modelo de corte metálico ortogonal, pero que no pueden medirse directamente en una operación.
21.13. Identifique las dos fuerzas que pueden medirse en el modelo de corte metálico ortogonal.
21.14. ¿Cuál es la relación entre el coeficiente de fricción y el ángulo de fricción en el modelo de corte ortogonal?
21.15. Describa con palabras qué dice la ecuación de Merchant.
21.16. ¿Cómo es la potencia requerida en una operación de corte en relación con la fuerza de corte?
21.17. ¿Qué es la energía específica en el maquinado de metales?
21.18. ¿Qué significa el término efecto de tamaño en el corte de metales?
21.19. ¿Qué es un termopar herramienta-viruta?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

21.1. ¿Cuál de los procesos de manufactura siguientes se clasifica como procesos de remoción de material? (dos respuestas correctas): *a*) colado, *b*) estirado, *c*) extrusión, *d*) forjado, *e*) molido, *f*) maquinado, *g*) moldeado, *h*) prensado e *i*) rechazado.
21.2. ¿La máquina herramienta "torno" se utiliza para realizar cuál de las siguientes operaciones de manufactura?: *a*) escariado, *b*) taladrado, *c*) aplanado, *d*) fresado o *e*) torneado.
21.3. ¿Con cuál de las formas geométricas siguientes está la operación de taladrado más íntimamente relacionada?: *a*) cilindro externo, *b*) plano liso, *c*) agujero redondo, *d*) cuerdas de tornillo o *e*) esfera.
21.4. Si las condiciones de corte en una operación de torneado son velocidad de corte = 300 ft/min, avance = 0.010 in/rev y profundidad de corte = 0.100 in, ¿cuál de las siguientes es la tasa de remoción de material?: *a*) 0.025 in^3/min, *b*) 0.3 in^3/min, *c*) 3.0 in^3/min, o *d*) 3.6 in^3/min.
21.5. ¿Una operación de desbaste primario involucra generalmente a cuál de las siguientes combinaciones de condiciones de corte?: *a*) alta v, f y d; *b*) alta v, baja f y d; *c*) baja v, alta f y d, o *d*) baja v, f y d, donde v = velocidad de corte, f = avance y d = profundidad.
21.6. ¿Cuáles de las siguientes son las características del modelo de corte ortogonal? (tres respuestas mejores): *a*) se utiliza un filo de corte circular, *b*) se utiliza una herramienta de corte múltiple, *c*) se utiliza una herramienta de una sola punta, *d*) solamente dos dimensiones juegan un papel activo en el análisis, *e*) el filo de corte es paralelo a la dirección de la velocidad de corte, *f*) el filo del corte es perpendicular a la dirección de la velocidad del corte y *g*)

los dos elementos de la forma de la herramienta son los ángulos de inclinación y de relieve.

21.7. ¿Cuál de las siguientes es la relación de espesor de viruta?: *a*) t_c/t_o, *b*) t_o/t_c, *c*) *f/d* o *d*) t_o/w, donde t_c = espesor de la viruta después del corte, t_o = espesor de la viruta antes del corte, *f* = avance, *d* = profundidad y *w* = ancho del corte.

21.8. ¿Cuál de los cuatro tipos de viruta se podría esperar en una operación de torneado conducida a baja velocidad de corte sobre un material de trabajo frágil? *a*) continua, *b*) continua con acumulación en el filo, *c*) discontinua, o *d*) dentada.

21.9. De acuerdo con la ecuación de Merchant, ¿cuál de los siguientes resultados podría tener un incremento en el ángulo de inclinación, si los otros factores permanecen igual (dos mejores respuestas): *a*) disminución en el ángulo de fricción, *b*) disminución de los requerimientos de potencia, *c*) disminución en el ángulo del plano de corte, *d*) incremento en el temperatura de corte, *e*) incremento en el ángulo del plano de corte?

21.10. Al usar el modelo de corte ortogonal para aproximar una operación de torneado, ¿el espesor de la viruta antes del corte t_o corresponde a cuál de los siguientes condiciones del torneado? *a*) profundidad de corte *d*, *b*) avance *f* o *c*) velocidad *v*.

21.11. ¿Cuál de los siguientes metales podría tener generalmente los caballos de fuerza unitarios más bajos en una operación de maquinado? *a*) aluminio, *b*) latón, *c*) hierro fundido o *d*) acero.

21.12. ¿Para cuál de los siguientes valores de espesor de viruta antes del corte t_o esperaría usted que fuera más grande la energía específica? *a*) 0.010 in. *b*) 0.025 in. *c*) 0.12 mm o *d*) 0.50 mm.

21.13. ¿Cuál de las siguientes condiciones de corte tiene un efecto mayor en la temperatura de corte? *a*) avance o *b*) velocidad?

PROBLEMAS

Formación de viruta y fuerzas de maquinado

21.1. En una operación ortogonal de corte, la herramienta tiene un ángulo de inclinación de 15º. El espesor de la viruta antes del corte es de 0.30 mm y el corte produce un espesor de viruta deformada de 0.65 mm. Calcule *a*) el ángulo del plano de corte y *b*) la deformación cortante para la operación.

21.2. En el problema 21.1, suponga que el ángulo de inclinación cambiara a α = 0°. Suponiendo que el ángulo de fricción permaneciera igual, determine *a*) el ángulo plano de corte, *b*) el espesor de la viruta y *c*) la deformación cortante para la operación.

21.3. En una operación de corte ortogonal, la herramienta de 0.250 in de ancho tiene un ángulo de inclinación de 5º. El torno se configura para que el espesor de la viruta antes del corte sea de 0.010 in. Después del corte, el espesor de la viruta deformada se mide y tiene un valor de 0.027 in. Calcule *a*) el ángulo del plano de corte y *b*) la deformación cortante para la operación.

21.4. En una operación de torneado, la velocidad de la aguja se configura para proporcionar una velocidad de corte de 1.8 m/s. El avance y profundidad del corte son 0.30 mm y 2.6 mm, respectivamente. El ángulo de inclinación de la herramienta es de 8°. Después del corte, el espesor de la viruta deformada es de 0.49 mm. Determine *a*) el ángulo plano de corte, *b*) la deformación cortante y *c*) la velocidad de remoción del material. Utilice el modelo de corte ortogonal como una aproximación del proceso de torneado.

21.5. La fuerza de corte y la fuerza de empuje en una operación de corte ortogonal son 1 470 N y 1 589 N, respectivamente. El ángulo de inclinación es de 5°, el ancho del corte es de 5.0 mm, el espesor de la viruta antes del corte es de 0.6 y la relación de espesor de la viruta es de 0.38. Determine *a*) la resistencia cortante del material de trabajo y *b*) el coeficiente de fricción en la operación.

21.6. La fuerza de corte y la fuerza de empuje se han medido en una operación de corte ortogonal y son de 300 lb y 291 lb, respectivamente. El ángulo de inclinación es de 10º, el ancho de corte de 0.200 in, el espesor de la viruta antes del corte de 0.015 y la relación de espesor de la viruta de 0.4. Determine *a*) la resistencia al corte del material de trabajo y *b*) el coeficiente de fricción de la operación.

21.7. Una operación de corte ortogonal se realiza usando un ángulo de inclinación de 15°, espesor de la viruta antes del corte de 0.012 in y ancho del corte de 0.100 in. La relación de espesor de la viruta medida después del corte es de 0.55. Determine *a*) el espesor de la viruta después del corte, *b*) el ángulo de corte, *c*) el ángulo de fricción, *d*) el coeficiente de fricción y *e*) la deformación cortante.

21.8. La operación de corte ortogonal descrita en el problema 21.7 involucra un material de trabajo cuya resistencia al corte es de 40 000 lb/in^2. Con base en sus respuestas al problema anterior, calcule *a*) la fuerza cortante, *b*) la fuerza de corte, *c*) la fuerza de empuje y *d*) la fuerza de fricción.

21.9. En una operación de corte ortogonal, el ángulo de inclinación es de –5º, el espesor de la viruta antes del corte es de 0.2 mm y el ancho del corte es de 4.0 mm. La relación de viruta es de 0.4. Determine *a*) el espesor de la viruta después del corte, *b*) el ángulo de corte, *c*) el ángulo de fricción, *d*) el coeficiente de fricción y *e*) la deformación cortante.

21.10. La resistencia al corte de cierto material de trabajo es de 50 000 lb/in^2. Una operación de corte ortogonal se realiza utilizando una herramienta con un ángulo de inclinación de 20° con las siguientes condiciones de corte: velocidad de 100 ft/min, espesor de la viruta antes del corte de 0.015 in y ancho del corte de 0.150 in. La relación de espesor de la viruta resultante es de 0.50. Determine *a*) el ángulo del pla-

no de corte, *b*) la fuerza cortante, *c*) la fuerza de corte y la fuerza de empuje y *d*) la fuerza de fricción.

21.11. Repite el problema 21.10 excepto porque el ángulo de inclinación se modificó a –5° y la relación de espesor de la viruta resultante es de 0.35.

21.12. Una barra de acero de carbono de 7.64 in de diámetro tiene una resistencia a la tensión de 65 000 lb/in^2 y una resistencia al corte de 45 000 lb/in^2. El diámetro se reduce utilizando una operación de torneado a una velocidad de corte de 400 ft/min. El avance es de 0.011 in/rev y la profundidad de corte es de 0.120 in. El ángulo de inclinación de la herramienta en la dirección del flujo de la viruta es de 13°. Las condiciones de corte dan como resultado una relación de viruta de 0.52. Utilizando el modelo ortogonal como una aproximación al torneado, determine *a*) el ángulo del plano de corte, *b*) la fuerza de corte, *c*) la fuerza cortante y la fuerza de avance, y *d*) el coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta.

21.13. Acero al bajo carbono con una resistencia a la tensión de 300 MPa y una resistencia al corte de 220 MPa se corta en una operación de torneado con una velocidad de corte de 3.0 m/s. El avance es de 0.20 mm/rev y la profundidad del corte es de 3.0 mm. El ángulo de inclinación de la herramienta es de 5º en la dirección del flujo de la viruta. La relación de viruta resultante es de 0.45. Utilizando el modelo ortogonal como una aproximación al torneado, determine *a*) el ángulo del plano de corte, *b*) la fuerza de corte, *c*) la fuerza cortante y la fuerza de avance.

21.14. Una operación de torneado se hace con un ángulo de inclinación de 10º, un avance de 0.010 in/rev y una profundidad de corte de 0.100 in. Se sabe que la resistencia al corte del material de trabajo es de 50 000 lb/in^2 y la relación de espesor de la viruta medida después del corte es de 0.40. Determine la fuerza de corte y la fuerza del avance. Use el modelo ortogonal de corte como una aproximación del proceso de torneado.

21.15. Demuestre cómo la ecuación 21.3 se deduce de la definición de la relación de viruta, ecuación 21.2 y figura 21.5*b*).

21.16. Demuestre cómo la ecuación 21.4 se deduce a partir de la figura 21.6.

21.17. Deduzca las ecuaciones de fuerza para *F, N,* F_S y F_n (ecuaciones 21.9 a 21.12 en el texto), utilizando el diagrama de fuerzas de la figura 21.11.

Potencia y energía en maquinado

21.18. En una operación de torneado de acero inoxidable con una dureza de 200 HB, la velocidad de corte de 200 m/min, el avance de 0.25 mm/rev y la profundidad del corte de 7.5 min, ¿cuánta potencia consumirá el torno para llevar a cabo esta operación si su eficiencia mecánica es de 90%? Utilice la tabla 21.2 para obtener el valor de energía específico apropiado.

21.19. En el problema anterior, calcule los requerimientos de potencia del torno si el avance es de 0.50 mm/rev.

21.20. En una operación de torneado con aluminio, las condiciones de corte son las siguientes: velocidad de corte de 900 ft/min, avance de 0.020 in/rev y profundidad de corte de 0.250 in. ¿Cuántos caballos de fuerza requiere el motor si el torno tiene una eficiencia mecánica = 87%? Utilice la tabla 21.2 para obtener el valor de caballos de fuerza unitaria apropiado.

21.21. En una operación de maquinado con acero simple al carbono cuya dureza de Brinell es de 275 HB, la velocidad de corte se configura a 200 m/min y la profundidad de corte es de 6.0 mm. El motor del torno consume 25 kW y su eficiencia mecánica es de 90%. Utilizando el valor de energía específica apropiada de la tabla 21.2, determine el avance máximo que se puede obtener en esta operación.

21.22. Se va a llevar a cabo una operación de torneado en un torno de 20 hp que tiene una eficiencia de 87%. El corte de desbaste primario se hace sobre una aleación de acero cuya dureza está en el rango de 325 a 335 HB. La velocidad de corte es de 375 ft/min. El avance es de 0.030 in/rev y la profundidad de corte es de 0.150 in. Con base en estos valores, ¿puede llevarse a cabo este trabajo en un torno de 20 hp? Utilice la tabla 21.2 para obtener el valor de caballos de fuerza unitaria más apropiado.

21.23. Suponga que la velocidad de corte de los problemas 21.7 y 21.8 es de 200 ft/min. A partir de sus respuestas en estos problemas, encuentre *a*) los caballos de fuerza consumidos en la operación, *b*) la tasa de remoción del material en in^3/min, *c*) los caballos de fuerza unitaria, hp-min/in^3, *d*) la energía específica (in-lb/in^3).

21.24. En el problema 21.12, el torno tiene una eficiencia mecánica de 0.83. Determine *a*) los caballos de fuerza consumidos por la operación de torneado, *b*) los caballos de fuerza que deben generarse por el torno y *c*) los caballos de fuerza unitaria y la energía específica para el material de trabajo en esta operación.

21.25. En una operación de torneado sobre un acero de bajo carbono (175 BHN), las condiciones de corte son: velocidad de corte de 400 ft/min, avance de 0.010 in/rev y profundidad de corte de 0.075 in. El torno tiene una eficiencia mecánica de 0.85. Con base en los valores de los caballos de fuerza unitaria de la tabla 21.2, determine *a*) los caballos de fuerza consumidos por la operación de torneado, *b*) los caballos de fuerza que debe generar el torno.

21.26. Repite el problema 21.25, excepto porque el avance es de 0.0075 in/rev y el material de trabajo es acero inoxidable (dureza Brinell = 240 HB).

21.27. Una operación de torneado se lleva a cabo en aluminio (100 BHN). Las condiciones de corte son las siguientes: velocidad de corte de 5.6 m/s, el avance de 0.25 mm/rev y la profundidad de corte de 2.0 mm. El torno tiene una eficiencia mecánica de 0.85. Con base en los valores de energía específica de la tabla 21.2 determine *a*) la potencia de corte y *b*) la potencia bruta en la operación de torneado, en Watts.

21.28. Resuelva el problema 21.27, pero con las modificaciones siguientes: velocidad de corte de 1.3 m/s, avance de 0.75 mm/rev y profundidad de 4.0 mm. Observe que a pesar de que la potencia usada en esta operación es prácticamente la misma que en el problema anterior, la velocidad de remoción de metal es aproximadamente 40% más grande.

21.29. Una operación de torneado se realiza en un torno corriente, usando una herramienta con un ángulo de inclinación igual a cero en la dirección del flujo de la viruta. El material de

trabajo es una aleación de acero con dureza Brinell de 325. El avance es de 0.015 in/rev, la profundidad de corte es de 0.125 in y la velocidad de corte es de 300 ft/min. Después del corte la relación del espesor de la viruta es de 0.45. *a*) Usando el valor aproximado de energía específica de la tabla 21.2, calcule los caballos de fuerza del motor si el torno tiene una eficiencia de 85%. *b*) Con base en los caballos de fuerza, calcule un estimado de la fuerza de corte para la operación de torneado. Use el modelo de corte ortogonal como una aproximación del proceso de torneado.

21.30. Un torno ejecuta una operación de torneado sobre una pieza de trabajo de 6 in de diámetro. La resistencia al corte del trabajo es de 40 000 lb/in^2 y la resistencia a la tensión es de 60 000 libras/in^2. El ángulo de inclinación de la herramienta es de 6°. La máquina está configurada para que la velocidad de corte sea de 700 ft/min, el avance es de 0.015 in/rev y la profundidad es de 0.090 in. El espesor de la viruta después de corte es de 0.025 in. Determine: *a*) los caballos de fuerza que requiere la operación, *b*) los caballos de fuerza unitaria de este material bajo estas condiciones, y *c*) los caballos de fuerza unitaria listada en la tabla 21.2 para una t_o de 0.010 in. Utilice el modelo de corte ortogonal como una aproximación del proceso de torneado.

Temperatura de corte

21.31. Se lleva a cabo un corte ortogonal en un metal cuyo calor específico volumétrico es de 1.0 J/g-ºC, una densidad de 2.9 g/cm^3 y una difusividad térmica de 0.8 cm^2/s. Se utilizan las condiciones de corte siguientes: la velocidad de corte es de 4.5 m/s, el espesor de la viruta sin cortar es de 0.25 mm y el ancho del corte es de 2.2 mm. La fuerza de corte tiene un valor de 1170 N. Utilizando la ecuación de Cook, determine la temperatura de corte si la temperatura ambiente es de 22 °C.

21.32. Considere una operación de torneado llevada a cabo sobre acero cuya dureza es de 225 HB a una velocidad de 3.0 m/s, un avance de 0.25 mm y una profundidad de 4.0 mm. Utilizando los valores de las propiedades térmicas que se encuentran en las tablas y definiciones de la sección 4.1 y el valor de la energía específica apropiada de la tabla 21.2, calcule un estimado de la temperatura de corte utilizando la ecuación de Cook. Suponga que la temperatura ambiente es de 20 °C.

21.33. Una operación de corte ortogonal se lleva a cabo con un cierto metal cuyo calor específico volumétrico es de 110 in-lb/in^3-ºF, y una difusividad térmica de 0.140 in^2/s. Se utilizan las condiciones de corte siguientes: velocidad de corte de 350 ft/min, espesor de la viruta antes del corte de 0.008 in y ancho del corte de 0.100 in. La fuerza de corte es de 200 lb. Utilizando la ecuación de Cook, determine la temperatura de corte si la temperatura ambiente es de 70 ºF.

21.34. Se desea estimar la temperatura de corte de una aleación de acero cuya dureza es de 240 Brinell. Utilice el valor de energía específica apropiado de la tabla 21.2 y calcule la temperatura de corte por medio de la ecuación de Cook de una operación de torneado en la que se utilizan las condiciones de corte siguientes: la velocidad de corte es de 500 ft/min, el avance es de 0.005 in/rev y la profundidad de corte es de 0.070 in. El material de trabajo tiene un calor específico volumétrico de 210 in lb/in^3-°F y una difusividad térmica de 0.16 in^2/s. Suponga que la temperatura ambiente es de 88 °F.

21.35. Una operación de maquinado ortogonal remueve metal a 1.8 in^3/min. La fuerza de corte en el proceso es de 300 lb. El material de trabajo tiene una difusividad térmica de 0.18 in^2/s y un calor específico volumétrico de 124 in-lb/in^3-°F. Si el avance $f = t_o = 0.010$ in y el ancho del corte es de 0.100 in, utilice la fórmula de Cook para calcular la temperatura de corte en la operación dado que la temperatura ambiente es de 70 °F.

21.36. Una operación de torneado utiliza una velocidad de corte de 200 m/min, un avance de 0.25 mm/rev y una profundidad de corte de 4.00 mm. La difusividad térmica del material de trabajo es de 20 mm^2/s y el calor específico volumétrico es de 3.5 (10^{-3}) J/mm^3-°C. Si un termo-acoplador herramienta-viruta mide 700 °C de incremento de temperatura arriba de la temperatura ambiente (20 ºC), determine la energía específica del material de trabajo para esta operación.

21.37. Durante un operación de torneado, se utilizó un termo-acoplador herramienta-viruta para medir la temperatura de corte. Se obtuvieron los datos de temperatura siguientes durante los cortes a tres diferentes velocidades de corte (el avance y la profundidad se mantuvieron constantes): 1) v = 100 m/min, T = 505 °C, 2) v = 130 m/min. T = 552 °C, 3) v = 160 m/min, T = 592 °C. Determine una ecuación para la temperatura en función de la velocidad de corte que esté en la forma de la ecuación de Trigger, ecuación 21.23.

22 OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS HERRAMIENTA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

El maquinado es el más versátil y preciso de todos los procesos de manufactura por su capacidad de producir una diversidad de piezas y características geométricas (por ejemplo, roscas de tornillos, dientes de engrane, superficies lisas). La fundición también puede producir una variedad de formas, pero carece de la precisión y exactitud del maquinado. En este capítulo, se describen las operaciones de maquinado y las máquinas herramienta utilizadas para llevarlas a cabo. La nota histórica 22.1 proporciona una breve historia de la evolución de la tecnología de las máquinas-herramienta.

Para introducir el tema en este capítulo, se ofrece un panorama acerca de la creación de la configuración geométrica de las piezas mediante el maquinado. Las piezas maquinadas se clasifican en rotacionales y no rotacionales (figura 22.1). Una pieza de trabajo

Nota histórica 22.1 *Tecnología de las máquinas herramienta.*

La remoción de material como un medio de manufactura se remonta a los tiempos prehistóricos cuando los seres humanos aprendieron a tallar la madera y esculpir piedras para hacer implementos de caza y labranza. Hay evidencias arqueológicas de que los antiguos egipcios usaron mecanismos rotatorios de palos y cuerdas para taladrar agujeros.

La aparición de las máquinas herramienta modernas se relaciona estrechamente con la Revolución Industrial. Cuando James Watt diseñó su máquina de vapor en Inglaterra alrededor de 1763, uno de los problemas técnicos que enfrentó fue hacer la perforación del cilindro lo suficientemente preciso para prevenir que el vapor se escapara alrededor del pistón. John Wilkinson construyó una máquina perforadora con una rueda movida por agua alrededor de 1775, la cual permitió a Watt construir su máquina de vapor. Esta máquina perforadora se reconoce frecuentemente como la primera máquina herramienta.

Otro inglés, Henry Maudsley, inventó el primer torno cortador de tornillos alrededor de 1800. Aunque se había usado el torno de madera por muchos siglos, la máquina de Maudsley adicionó una herramienta deslizante mecanizada, con la cual se pudieron desempeñar operaciones de avance y roscado con mucha mayor precisión que por cualquier medio anterior.

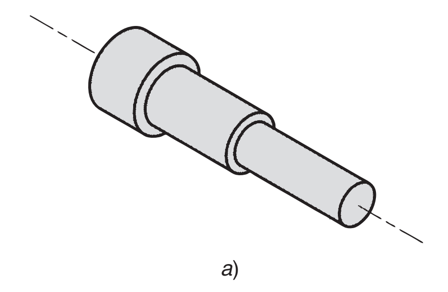
A Eli Withney se le acredita la invención de la primera máquina fresadora en Estados Unidos, alrededor de 1818. El desarrollo del cepillo y el perfilador ocurrió en Inglaterra entre 1800 y 1835, como respuesta a la necesidad de hacer componentes destinados a la máquina de vapor, al equipo textil y a otras máquinas asociadas con la Revolución Industrial. La prensa taladradora mecanizada fue inventada por James Nasmyth alrededor de 1846, la cual permitió taladrar agujeros de precisión en el metal.

La mayoría de las máquinas convencionales de perforado, tornos, máquinas fresadoras, cepillos, perfiladoras y prensas taladradoras usadas hoy en día tienen el mismo diseño básico que las versiones antiguas, creadas durante los dos últimos siglos. Los centros modernos de maquinado, que son máquinas herramienta capaces de ejecutar más de un tipo de operación de corte, se introdujeron en la década de 1950, después de que se inventó el control numérico (nota histórica 39.1).

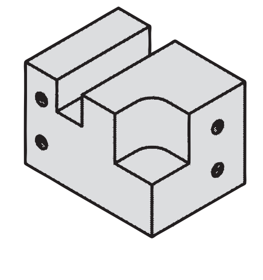
rotacional tiene la forma de cilindro o disco. En la operación característica que produce estas formas, una herramienta de corte elimina material de una pieza de trabajo giratoria. Los ejemplos incluyen el torneado y el perforado. El taladro se relaciona estrechamente, sólo que en la mayoría de las operaciones de taladrado se crea una forma cilíndrica interna y la herramienta es la que gira (en lugar del trabajo). Una pieza de trabajo ***no rotacional*** (también llamada ***prismática***) es una pieza en forma de bloque o placa, como se ilustra en la figura 22.1*b*). Esta forma se logra por movimientos lineales de la pieza de trabajo combinada con movimientos lineales o rotatorios de la herramienta. Las operaciones en esta categoría incluyen fresado, perfilado, cepillado y aserrado.

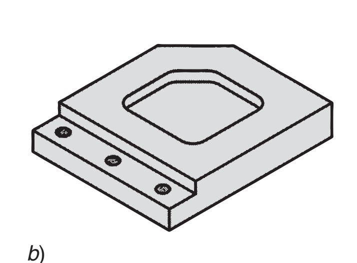
Cada operación de maquinado produce una forma característica debido a dos factores: 1) los movimientos relativos entre la herramienta y la pieza de trabajo y 2) la forma de la herramienta de corte. Estas operaciones se clasifican según la forma de la pieza creada, ya sea por generación o por formado. En la ***generación***, la forma de la pieza de trabajo está determinada por la trayectoria del avance de la herramienta de corte. La trayectoria seguida por la herramienta durante su movimiento de avance se imparte a la superficie de trabajo a fin de crear la forma. Los ejemplos de generación de formas de trabajo en

FIGURA 22.1 Las piezas maquinadas se clasifican en: *a*) rotacionales o *b*) no rotacionales. Aquí se muestran como bloques y piezas planas.



a)





b)

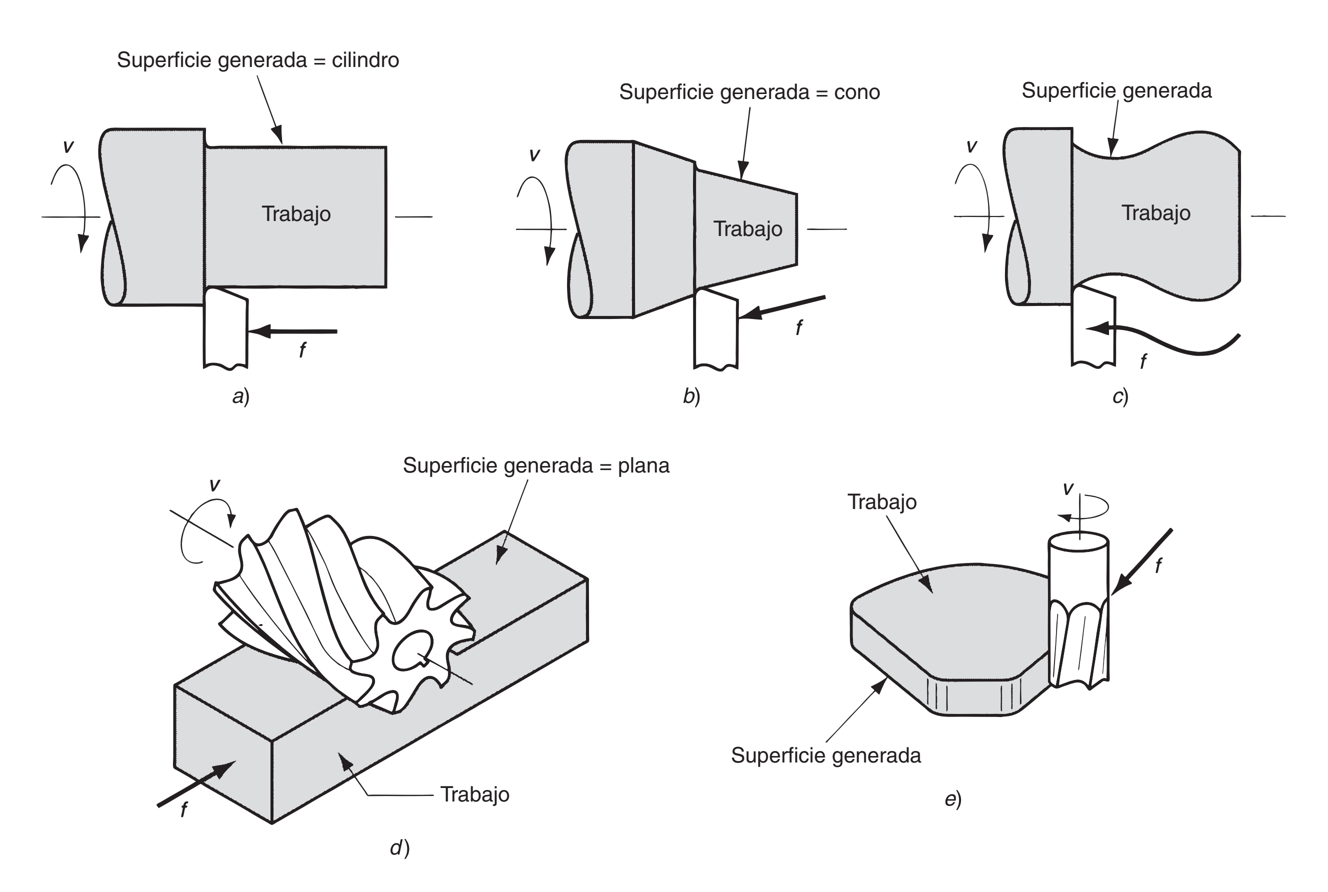


FIGURA 22.2 Generación de formas en maquinado: *a*) torneado recto, *b*) torneado ahusado, *c*) torneado de contornos, *d*) fresado plano y *e*) fresado perfilado.

maquinado incluyen el torneado recto, el torneado ahusado, el torneado de contornos, el fresado periférico y el fresado de perfiles, todos ellos ilustrados en la figura 22.2. En cada una de estas operaciones la remoción de material se realiza por el movimiento de la velocidad en la operación, pero la forma de la pieza se determina por el movimiento de avance. La trayectoria de avance puede involucrar variaciones en la profundidad o el ancho de corte durante la operación. Por ejemplo, en el torneado de contorno y las operaciones de fresado de perfiles que se muestran en la figura, el movimiento de avance produce cambios en la profundidad y el ancho, respectivamente, conforme el corte prosigue.

En el ***formado***, la herramienta de corte forma la configuración geométrica de la pieza. En efecto, el filo de corte de la herramienta tiene el reverso de la forma a producir en la superficie de la pieza. El torneado de formas, el taladrado y el escariado son ejemplos de este caso. En estas operaciones, ilustradas en la figura 22.3, la herramienta de corte imparte su forma al trabajo a fin de crear la forma de la pieza. Las condiciones de corte en el formado incluyen generalmente el movimiento primario de velocidad combinado con un movimiento de avance que se dirige directamente hacia el trabajo. La profundidad de corte en esta categoría de maquinado se refiere a la penetración final dentro del trabajo una vez que termina el movimiento de avance.

El formado y la generación se combinan algunas veces en una operación, como se ilustra en la figura 22.4 para el corte de roscas sobre un torno y el tallado de ranuras en una fresadora. En el corte de roscas la forma puntiaguda de la herramienta de corte determina la forma de las cuerdas, pero la gran velocidad de avance genera las cuerdas. En el ranurado (también llamado fresado de ranura), el ancho del cortador determina el ancho de la rendija, pero el movimiento de avance crea la ranura.

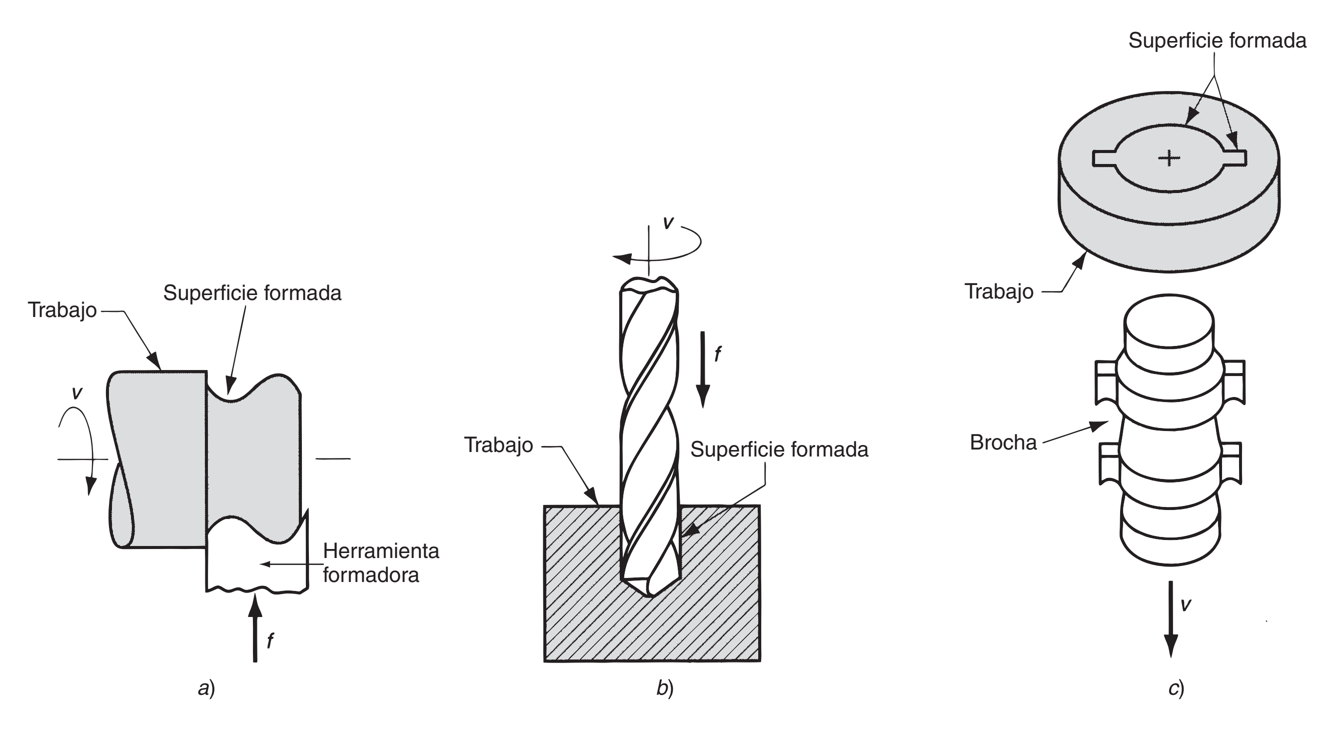


FIGURA 22.3 Creación de formas en maquinado: *a*) torneado de formas, *b*) taladrado y *c*) brochado.

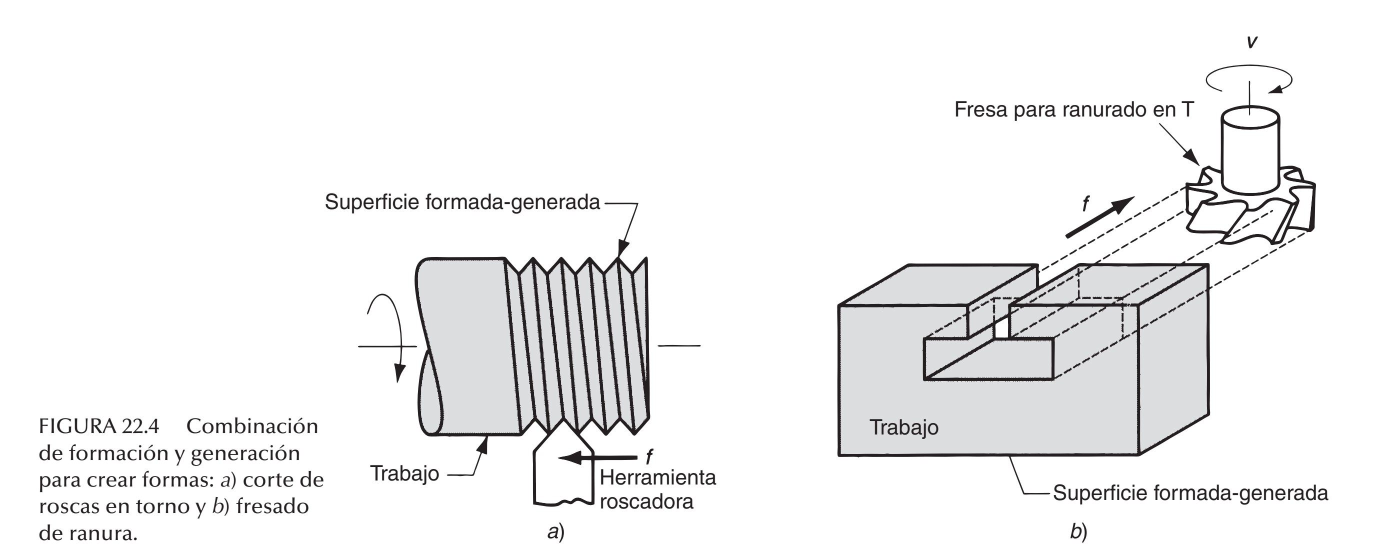


FIGURA 22.4 Combinación de formación y generación para crear formas: *a*) corte de roscas en torno y *b*) fresado de ranura.

22.1 TORNEADO Y OPERACIONES AFINES

El ***torneado*** es un proceso de maquinado en el cual una herramienta de una sola punta remueve material de la superficie de una pieza de trabajo cilíndrica en rotación; la herramienta avanza linealmente y en una dirección paralela al eje de rotación, como se ilustra en las figuras 21.3*a*), 21.5 y 22.5. El torneado se lleva a cabo tradicionalmente en una

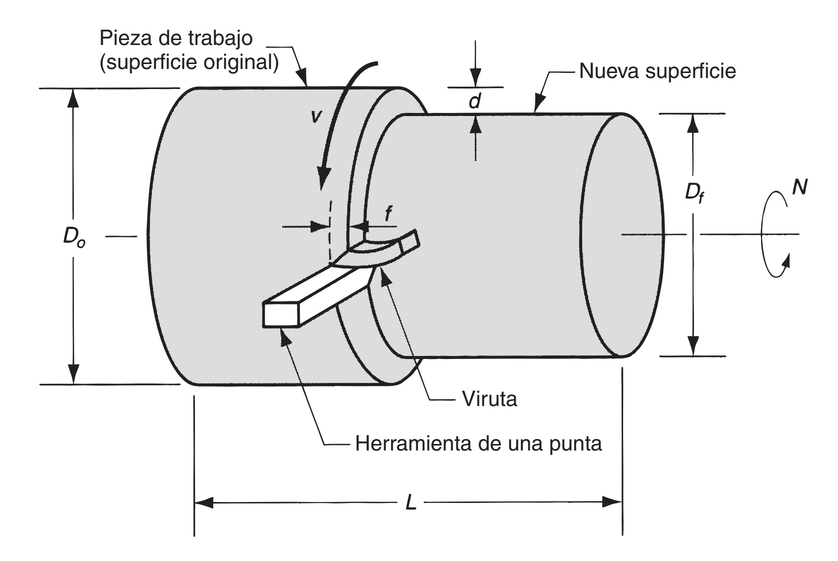


FIGURA 22.5 Operación de torneado.

máquina herramienta llamada ***torno***, la cual suministra la potencia para tornear la pieza a una velocidad de rotación determinada con avance de la herramienta y profundidad de corte especificados.

22.1.1 Condiciones de corte en el torneado

La velocidad de rotación en el torneado se relaciona con la velocidad de corte requerida en la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo por la ecuación

$$N = \frac{v}{\pi D_o} \tag{22.1}$$

donde N = velocidad de rotación, rev/min; v = velocidad de corte, m/min (ft/min); y D_o = diámetro original de la pieza, m (ft).

La operación de torneado reduce el diámetro del trabajo D_o al diámetro final D_f. El cambio de diámetro se determina por la profundidad de corte d:

$$D_f = D_o - 2d \tag{22.2}$$

El avance en el torneado se expresa generalmente en mm/rev (in/rev). Este avance se puede convertir a velocidad de avance lineal en mm/min (in/min) mediante la fórmula:

$$f_r = Nf \tag{22.3}$$

donde f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min); y f = avance, mm/rev (in/rev).

El tiempo para maquinar una pieza de trabajo cilíndrica de un extremo a otro está dado por

$$T_m = \frac{L}{f_r} \tag{22.4}$$

donde T_m = tiempo de maquinado en min; y L = longitud de la pieza cilíndrica en mm (in). Un cálculo más directo del tiempo de maquinado lo proporciona la ecuación siguiente:

$$T_m = \frac{\pi D_o L}{f v} \tag{22.5}$$

donde D_o = diámetro del trabajo, mm (in); L =longitud de la pieza de trabajo, mm (in); f = avance, mm/rev (in/rev); y v = velocidad de corte, mm/min (in/min). Como práctica general, se añade una pequeña distancia a la longitud al principio y al final de la pieza de trabajo para dar margen a la aproximación y al sobrerrecorrido de la herramienta.

La velocidad volumétrica de remoción del material se puede determinar más convenientemente por la ecuación siguiente:

$$R_{MR} = vfd \tag{22.6}$$

donde R_{MR} = velocidad de remoción de material, mm^3/min (in^3/min). En esta ecuación las unidades de f se expresan simplemente como mm (in), ignorando el efecto de la rotación del torneado. Asimismo, se debe tomar las medidas necesarias para asegurarse de que las unidades de la velocidad sean consistentes con las de f y d.

22.1.2 Operaciones relacionadas con el torneado

Además del torneado, se puede realizar una gran variedad de operaciones de maquinado en un torno. En la figura 22.6 se ilustran las siguientes:

a) ***Careado.*** La herramienta se alimenta radialmente sobre el extremo del trabajo rotatorio para crear una superficie plana.

b) ***Torneado ahusado o cónico.*** En lugar de que la herramienta avance paralelamente al eje de rotación del trabajo, lo hace en cierto ángulo creando una forma cónica.

c) ***Torneado de contornos.*** En lugar de que la herramienta avance a lo largo de una línea recta paralela al eje de rotación como en torneado, sigue un contorno diferente a la línea recta, creando así una forma contorneada en la pieza torneada.

d) ***Torneado de formas.*** En esta operación llamada algunas veces ***formado***, la herramienta tiene una forma que se imparte al trabajo y se hunde radialmente dentro del trabajo.

e) ***Achaflanado.*** El borde cortante de la herramienta se usa para cortar un ángulo en la esquina del cilindro y forma lo que se llama un “chaflan”.

f) ***Tronzado.*** La herramienta avanza radialmente dentro del trabajo en rotación, en algún punto a lo largo de su longitud, para trozar el extremo de la pieza. A esta operación se le llama algunas veces ***partición***.

g) ***Roscado.*** Una herramienta puntiaguda avanza linealmente a través de la superficie externa de la pieza de trabajo en rotación y en dirección paralela al eje de rotación, a una velocidad de avance suficiente para crear cuerdas roscadas en el cilindro.

h) ***Perforado.*** Una herramienta de punta sencilla avanza en línea paralela al eje de rotación, sobre el diámetro interno de un agujero existente en la pieza.

i) ***Taladrado.*** El taladrado se puede ejecutar en un torno, haciendo avanzar la broca dentro del trabajo rotatorio a lo largo de su eje. El ***escariado*** se puede realizar en forma similar.

j) ***Moleteado.*** Ésta es una operación de maquinado porque no involucra corte de material. Es una operación de formado de metal que se usa para producir un rayado regular o un patrón en la superficie de trabajo.

Las herramientas de una sola punta (sección 23.3.1) se usan en la mayoría de las operaciones ejecutadas en tornos. Las herramientas de corte para el torneado, careado, ahusado, contorneado, chaflanado y perforado son herramientas de una sola punta. Una operación de roscado se ejecuta usando una herramienta plana sencilla, diseñada con la

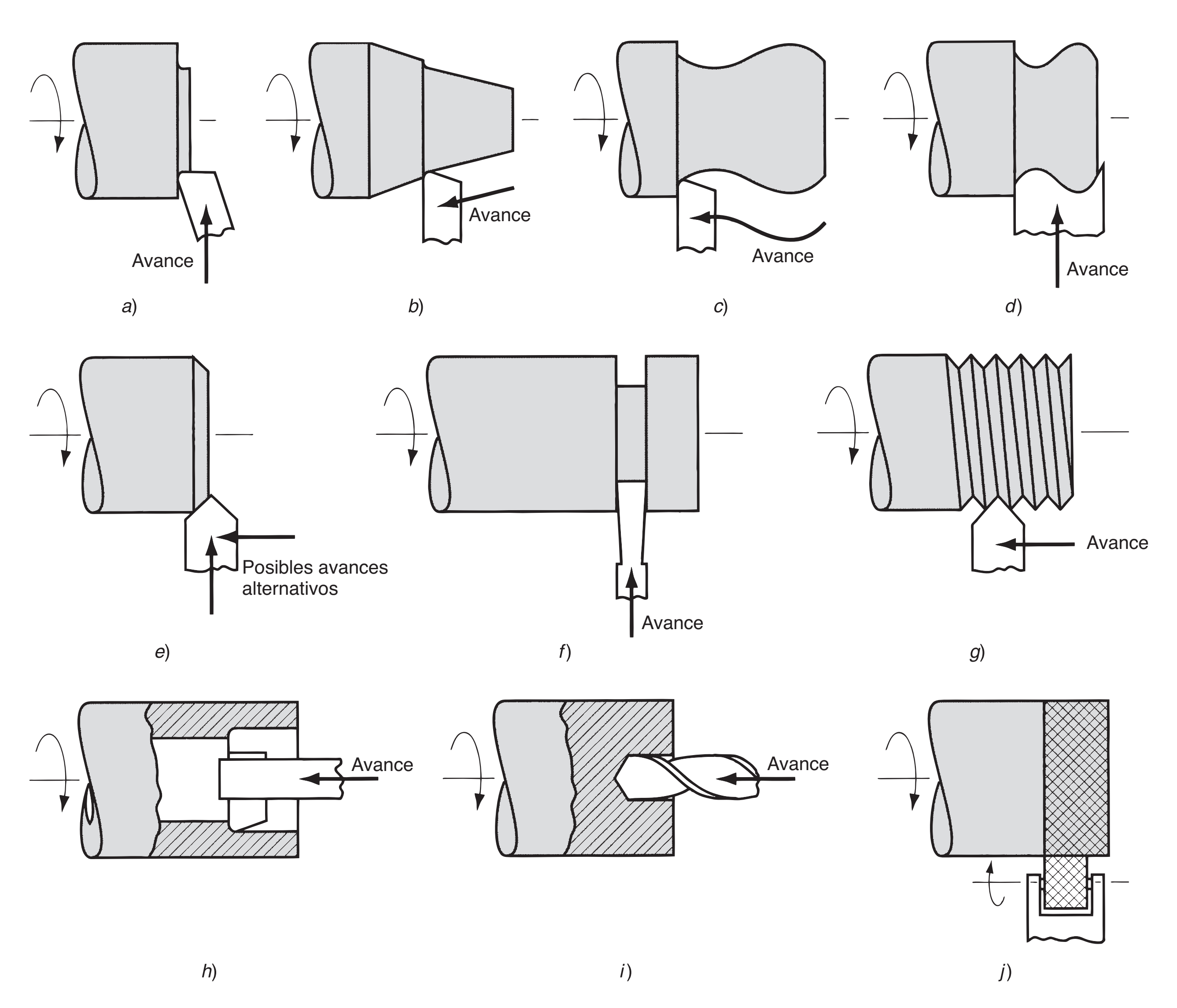


FIGURA 22.6 Otras operaciones diferentes al torneado que se realizan en un torno: *a*) careado, *b*) torneado ahusado, *c*) torneado de contornos, *d*) torneado de formas, *e*) achaflanado, *f*) tronzado, *g*) roscado, *h*) perforado, *i*) taladrado y *j*) moleteado.

forma de la cuerda a producir. Ciertas operaciones requieren herramientas diferentes a las de una sola punta. El torneado de formas se ejecuta con una de diseño especial llamada herramienta de forma. El perfil de la forma tallada en la herramienta establece la forma de la pieza de trabajo. Una herramienta de tronzado es básicamente una herramienta de forma. El taladrado se realiza mediante una broca (sección 23.3.2). El moleteado se ejecuta con una herramienta de moleteado que consiste en dos rodillos formadores endurecidos y montados sobre sus centros. Los rodillos formadores tienen el patrón de moleteado deseado en sus superficies. Para ejecutar el moleteado, se presiona la herramienta contra la superficie de la pieza rotatoria con la presión suficiente para imprimir el patrón sobre la superficie de trabajo.

22.1.3 El torno mecánico

El torno básico usado para torneado y operaciones afines es un ***torno mecánico***. Es una máquina herramienta muy versátil que se opera en forma manual y se utiliza ampliamente en producción baja y media. El término ***máquina*** (engine en inglés) se originó en el tiempo en que estos mecanismos eran movidos por máquinas de vapor.

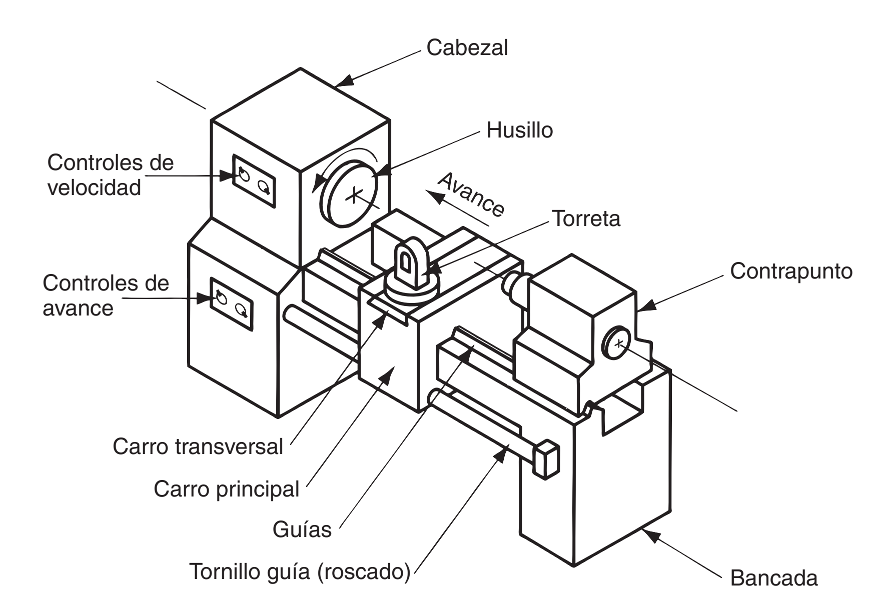


FIGURA 22.7 Diagrama de un torno mecánico, en que se indican sus componentes principales.

Tecnología del torno mecánico. La figura 22.7 es un diagrama de un torno mecánico en el que se muestran sus componentes principales. El ***cabezal*** contiene la unidad de transmisión que mueve el husillo que hace girar al trabajo. Opuesta al cabezal está el ***contrapunto***, en el cual se monta un centro para sostener el otro extremo de la pieza de trabajo.

La herramienta de corte es sostenida por una ***torreta*** que se encuentra fija al ***carro transversal***, que se ensambla al ***carro principal***. El carro principal se diseña para deslizarse sobre las ***guías*** del torno a fin de hacer avanzar la herramienta paralelamente al eje de rotación. Las guías son una especie de rieles a lo largo de los cuales se mueve el carro y están hechas con gran precisión para lograr un alto grado de paralelismo respecto al eje del husillo. Las guías se construyen sobre la ***bancada*** del torno que provee un armazón rígido para la máquina herramienta.

El carro se mueve por medio de un tornillo guía que gira a la velocidad propia para obtener la velocidad de avance deseada. El carro transversal está diseñado para avanzar en una dirección perpendicular al movimiento del carro. Por tanto, al mover el carro, la herramienta puede avanzar paralela al eje del trabajo para ejecutar el torneado recto. Y al mover el carro transversal, la herramienta puede avanzar radialmente dentro del trabajo para ejecutar el careado, el torneado de forma o la operación de tronzado.

El torno mecánico convencional y la mayoría de otras máquinas descritas en esta sección son ***máquinas de torneado horizontal***, es decir, el eje del husillo es horizontal. Esto es adecuado para la mayoría de los trabajos de torno donde la longitud es mayor que el diámetro. Para trabajos donde el diámetro es mayor que la longitud y el trabajo es pesado, es más conveniente orientar el trabajo de manera que gire alrededor de un eje vertical; éstas son las ***máquinas de torneado vertical***.

El tamaño del torno se designa por el volteo y la máxima distancia admisible entre centros. El ***volteo*** es el diámetro máximo de la pieza de trabajo que puede girar el husillo; se determina como el doble de la distancia que existe entre el eje central del husillo y las guías de la máquina. El máximo tamaño real de la pieza de trabajo cilíndrica que puede acomodarse en el torno es algo más pequeña, debido a que el carro y la corredera lateral están sobre las guías. ***La máxima distancia entre los centros*** indica la longitud máxima de la pieza de trabajo que puede ser montada entre el cabezal y el contrapunto. Por ejemplo, un torno de 350 mm × 1.2 m (14 in × 48 in) indica que el volteo es de 350 mm (14 in) y la máxima distancia entre centros es de 1.2 m (48 in).

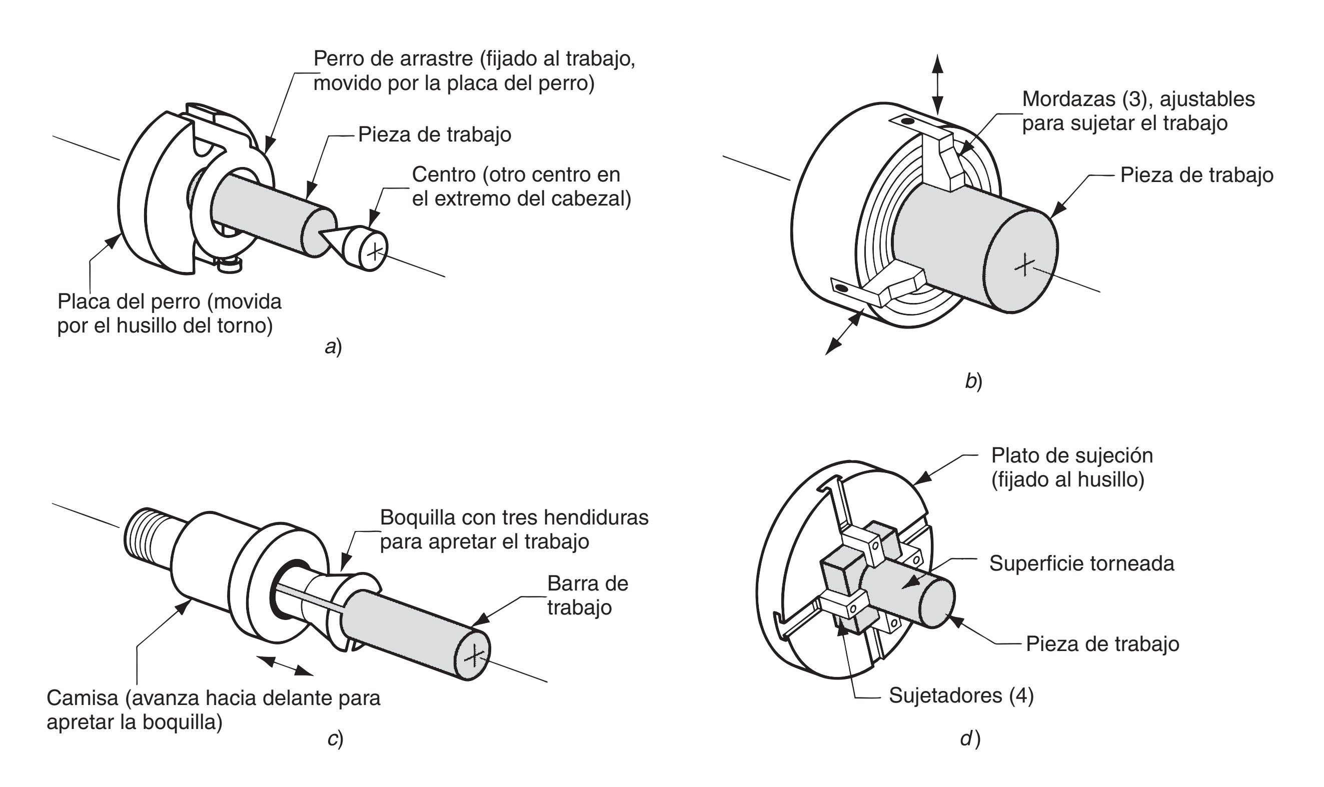


FIGURA 22.8 Cuatro métodos para sujetar el trabajo en un torno: *a*) montado del trabajo entre centros usando un perro de arrastre, *b*) mandril de tres mordazas, *c*) boquilla y *d*) plato de sujeción para piezas de trabajo no cilíndricas.

Métodos de sujeción del trabajo al torno Se usan cuatro métodos comunes para sujetar las piezas de trabajo en el torneado, que a su vez consisten en varios mecanismos para sujetar el trabajo, centrarlo y mantenerlo en posición sobre el eje del husillo y hacerlo girar. Los métodos se ilustran en la figura 22.8 y son: *a*) montura de trabajo entre centros, *b*) mandril, *c*) boquilla y *d*) plato de sujeción.

La sujeción de trabajo ***entre centros*** se refiere al uso de dos centros, uno en el cabezal y el otro en el contrapunto, como se muestra en la figura 22.8*a*). Este método es apropiado para piezas que tienen una alta relación entre la longitud y el diámetro. En el centro del cabezal se fija una brida llamada ***perro*** o plato de arrastre, en la parte exterior del trabajo que se usa para transmitir la rotación del husillo. El centro del contrapunto tiene una punta en forma de cono que se inserta en un agujero practicado en el extremo del trabajo. El centro del contrapunto puede ser un centro "vivo" o un centro "muerto". ***Un centro vivo*** gira en un cojinete del contrapunto, de manera que no hay rotación relativa entre el trabajo y el centro vivo y por tanto no hay fricción. En contraste, un ***centro muerto*** está fijo en el contrapunto y no gira; la pieza de trabajo gira alrededor de la punta. Debido a la fricción y a la acumulación del calor que resulta, esta disposición se usa normalmente a menores velocidades de rotación. El centro vivo se puede usar a altas velocidades.

El ***mandril***, figura 22.8*b*), tiene varios diseños, con tres o cuatro mordazas para sostener la pieza cilíndrica sobre su diámetro exterior. Las mordazas se diseñan frecuentemente para sostener también el diámetro interior de una pieza tubular. Un mandril ***autocentrante*** tiene un mecanismo que mueve simultáneamente las mordazas hacia dentro o hacia fuera, y de esta forma centra el trabajo en el eje del husillo. Otros mandriles permiten la operación independiente de cada mordaza. Los mandriles se pueden usar con o sin el centro del contrapunto. Para piezas con baja relación entre la longitud y el diámetro, la sujeción

de la pieza al mandril en forma empotrada (en voladizo) es por lo general suficiente para soportar las fuerzas de corte. Para barras largas de trabajo se necesita el soporte del contrapunto.

Una ***boquilla*** consiste en un buje tubular con hendiduras longitudinales que corren sobre la mitad de su longitud e igualmente espaciadas alrededor de su circunferencia, como se muestra en la figura 22.8*c*). El diámetro interior de la boquilla se usa para sostener trabajos de forma cilíndrica como barras. Debido a las hendiduras, un extremo de la boquilla puede apretarse para reducir su diámetro y suministrar una presión de agarre segura sobre el trabajo. Como hay un límite en la reducción que se puede obtener en una boquilla de cualquier diámetro, estos dispositivos de sujeción del trabajo se deben hacer en varias medidas para igualar el tamaño particular de la pieza de trabajo.

Un ***plato de sujeción***, figura 22.8*d*), es un dispositivo para sujetar el trabajo que se fija al husillo del torno y se usa para sostener piezas con formas irregulares. Debido a su forma irregular, estas piezas no se pueden sostener por otros métodos de sujeción. Por tanto, el plato está equipado con mordazas diseñadas a la medida de la forma particular de la pieza.

22.1.4 Otros tornos y máquinas de torneado

Además de los tornos mecánicos, se han inventado otras máquinas de tornear para satisfacer funciones particulares o para automatizar el proceso de torneado. Entre estas máquinas están: 1) el torno para herramientas, 2) el torno de velocidad, 3) el torno revólver, 4) el torno de mandril, 5) la máquina automática de tornillos y 6) el torno controlado numéricamente.

El torno para herramientas y el torno de velocidad están íntimamente relacionados con el torno mecánico. ***El torno para herramientas*** es más pequeño y tiene más velocidades y avances disponibles. Se construye también para precisiones más altas en concordancia con su propósito de fabricar componentes para herramientas, accesorios y otros dispositivos de alta precisión.

El torno de velocidad es más simple en su construcción que el torno mecánico. No tiene carro principal ni carro transversal ni tampoco tornillo guía para manejar el carro. El operador sostiene la herramienta de corte usando un sostén fijo en la bancada del torno. Las velocidades son más altas en el torno de velocidad, pero el número de velocidades es limitado. Las aplicaciones de este tipo de máquina incluyen el torneado de madera, el rechazado de metal y operaciones de pulido.

Un torno revólver es un torno operado manualmente en el cual el contrapunto se ha reemplazado por una torreta que sostiene hasta seis herramientas de corte. Estas herramientas se pueden poner rápidamente en acción frente al trabajo, una por una, girando la torreta. Además, el poste convencional de herramientas que se usa en el torno mecánico está remplazado por una torreta de cuatro lados, que es capaz de poner cuatro herramientas en posición. Dada la capacidad de cambios rápidos de herramientas, el torno revólver se usa para trabajos de alta producción que requieren una secuencia de cortes sobre la pieza.

El torno de mandril, como su nombre lo indica, usa un mandril en el husillo para sostener la pieza de trabajo. El contrapunto está ausente en esta máquina, de manera que las piezas no se pueden montar entre los centros. Esto restringe el uso de un torno de mandril a piezas cortas y ligeras. La disposición de la operación es similar al torno revólver, excepto porque las acciones de avance de las herramientas de corte se controlan más en forma automática que mediante un operador. La función del operador es cargar y descargar las piezas.

Una máquina de barra es similar al torno de mandril, excepto porque se usa una boquilla en lugar de un mandril, la cual permite alimentar barras largas a través del cabezal en posición de trabajo. Al final de cada ciclo de maquinado, una operación de corte retira la

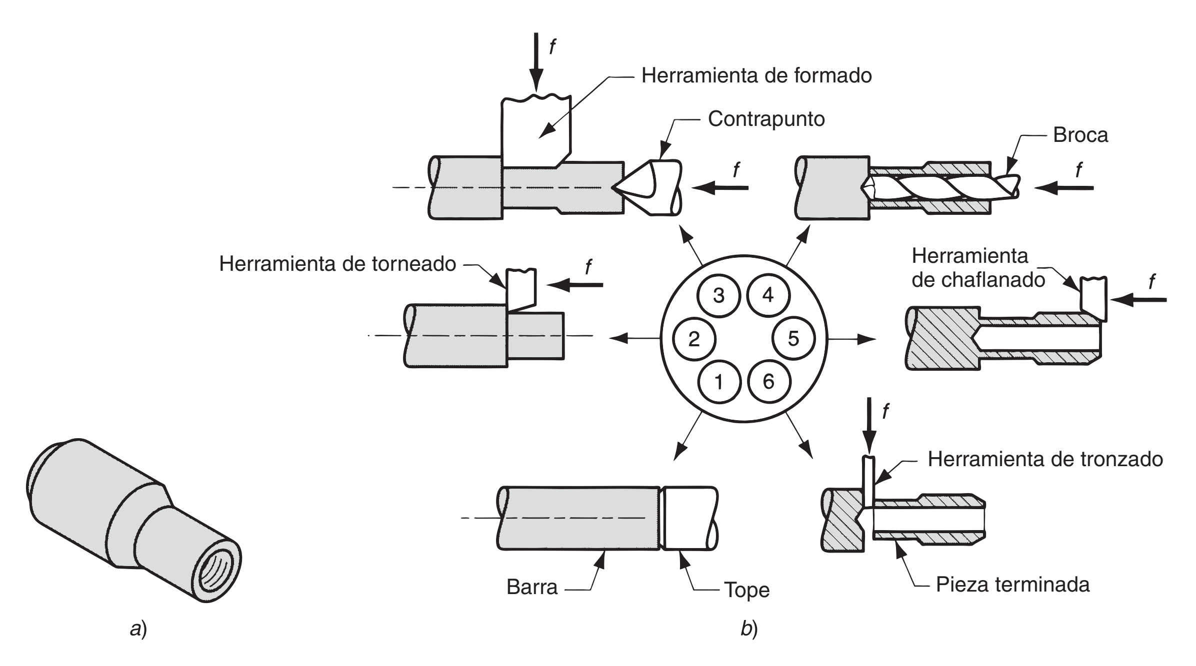


FIGURA 22.9 *a*) Tipo de pieza producida en una máquina de barras automática de seis husillos y *b*) secuencia de operaciones para producir la pieza: 1) avance del material hasta el tope, 2) torneado del diámetro principal, 3) formado del segundo diámetro y centrado, 4) taladrado, 5) achaflanado y 6) tronzado.

pieza torneada. La barra se corre entonces hacia delante para presentar nuevo material para la próxima pieza. El avance del material, así como los corrimientos y los avances de las herramientas de corte, se realizan automáticamente. Debido al alto nivel de operación automática, frecuentemente se le da a esta máquina el nombre de ***máquina de barras automática***. Una aplicación importante de este tipo de máquinas es la producción de tornillos y piezas similares de artículos de ferretería. A menudo se usa el término ***máquina automática de tornillos*** para las máquinas que se usan en estas aplicaciones.

Las máquinas de barras pueden clasificarse como de husillo simple y de husillo múltiple. ***Una máquina de barras de husillo*** simple tiene un husillo que permite usar solamente una herramienta de corte a la vez por cada pieza que se maquina. Por tanto, mientras cada herramienta corta el trabajo las otras herramientas están ociosas (los tornos revólver y los tornos de mandril están también limitadas por esta operación secuencial no simultánea). Para incrementar la utilización de las herramientas de corte y la velocidad de producción existen las ***máquinas de barras de husillo múltiple***. Estas máquinas tienen más de un husillo, de manera que muchas piezas se pueden maquinar simultáneamente por muchas herramientas. Por ejemplo, una máquina de barras automática de seis husillos puede cortar seis piezas al mismo tiempo, como se muestra en la figura 22.9. Al final de cada ciclo de maquinado, los husillos (incluidas las boquillas y las barras de trabajo) se corren a la posición siguiente. En la figura, cada pieza debe ser cortada en forma secuencial por cinco juegos de herramientas de corte que toman seis ciclos de maquinado (la posición 1 es para avanzar la barra a una "tope"). Con este arreglo, cada pieza se completa al final de cada ciclo. Como resultado, una máquina automática para tornillos con seis husillos tiene la velocidad más alta de producción que cualquier máquina de torneado.

La secuenciación y la actuación de los movimientos en las máquinas para tornillos y de mandril se han controlado tradicionalmente por medio de levas y otros dispositivos mecánicos. La forma moderna es el ***control numérico computarizado*** (CNC), en el que las operaciones de la máquina herramienta son controlados por un "programa de instrucciones" (sección 39.1.4). El CNC es un medio sofisticado y muy versátil para controlar los dispositivos mecánicos, que ha conducido a la creación de máquinas herramienta capaces de ciclos de maquinado y formas geométricas más complejas y a niveles más altos de operación automática que las máquinas para tornillos convencionales y las máquinas de mandril.

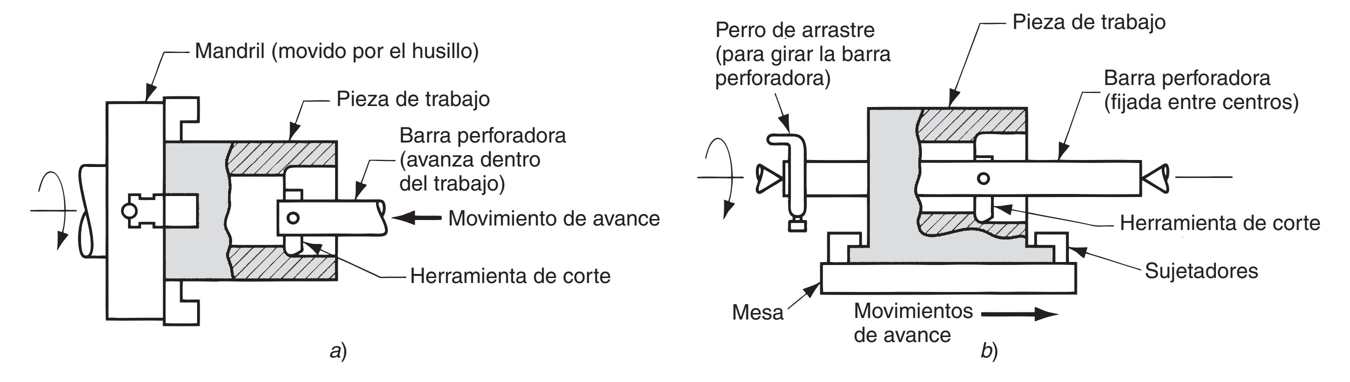


FIGURA 22.10 Dos formas de perforado horizontal: *a*) una barra perforada avanza dentro de una pieza de trabajo rotatoria y *b*) el trabajo avanza frente a una barra perforadora rotatoria.

El torno de CNC es un ejemplo de estas máquinas de tornear, y es especialmente útil para operaciones de torneado en contorno con tolerancias de trabajo estrechas. En la actualidad, casi todas las máquinas de barras y tornos de mandril se implementan con CNC.

22.1.5 Máquinas perforadoras

El perforado es similar al torneado. Usa una herramienta de una sola punta contra una pieza de trabajo en rotación. La diferencia es que el perforado se realiza en el diámetro interior de un agujero existente, en lugar de en el diámetro exterior de un cilindro existente. En efecto, el perforado es una operación de torneado interno. Las máquinas herramienta usadas para realizar las operaciones de perforado se llaman ***máquinas perforadoras*** (también ***molinos perforadores***). Se podría esperar que las máquinas perforadoras tuvieran características comunes con las máquinas de torneado; ciertamente, como se indicó antes, los tornos se usan algunas veces para realizar el perforado.

Las máquinas perforadoras pueden ser horizontales o verticales. La designación se refiere a la orientación del eje de rotación del husillo de la máquina o de la pieza de trabajo. En una operación de ***perforado horizontal***, la disposición se puede arreglar en cualquiera de dos formas. En la primera, el trabajo se fija a un husillo giratorio y la herramienta a una barra volada que la haga avanzar dentro del trabajo, como se ilustra en la figura 22.10*a*). La máquina que perfora en esta disposición debe ser muy rígida para evitar la deflexión y la vibración durante el corte. Para lograr alta rigidez, las barras perforadas se hacen frecuentemente de carburo cementado, cuyo módulo de elasticidad se aproxima a 620×10^3 MPa (90×10^6 lb/in^2). La figura 22.11 muestra una barra perforadora de carburo.

En la segunda disposición posible la herramienta se monta a una barra perforadora, la cual se soporta y gira entre sus centros. El trabajo se sujeta a un mecanismo de alimentación que lo pasa frente a la herramienta. Esta disposición, figura 22.10*b*), se puede usar para realizar una operación de perforado en un torno convencional.

Una ***máquina de perforado vertical*** (VBM por sus siglas en inglés) se usa para piezas pesadas de trabajo con diámetros grandes; por lo general el diámetro de la pieza de trabajo es más grande que su longitud. Como se muestra en la figura 22.12, la pieza se monta en una mesa de trabajo que gira respecto a la base de la máquina. Hay mesas de trabajo hasta de 40 pies de diámetro. La máquina perforadora típica puede poner en posición y hacer avanzar varias herramientas de corte simultáneamente. Las herramientas se montan en cabezales de herramientas que pueden avanzar horizontal y verticalmente respecto a la mesa de trabajo. Uno o dos cabezales se montan horizontalmente en un carril transversal y se ensamblan en el bastidor de herramientas de la máquina por encima de la mesa de trabajo. Las herramientas de corte montadas por encima del trabajo se pueden usar para carear y perforar. Además de las herramientas sobre el carril transversal, se pueden montar

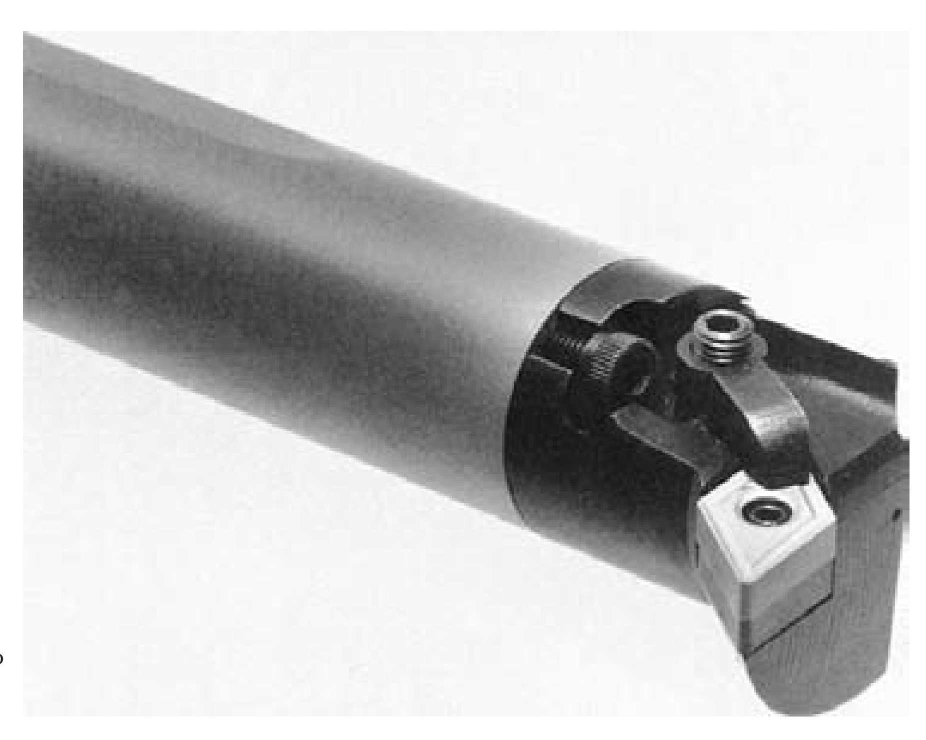
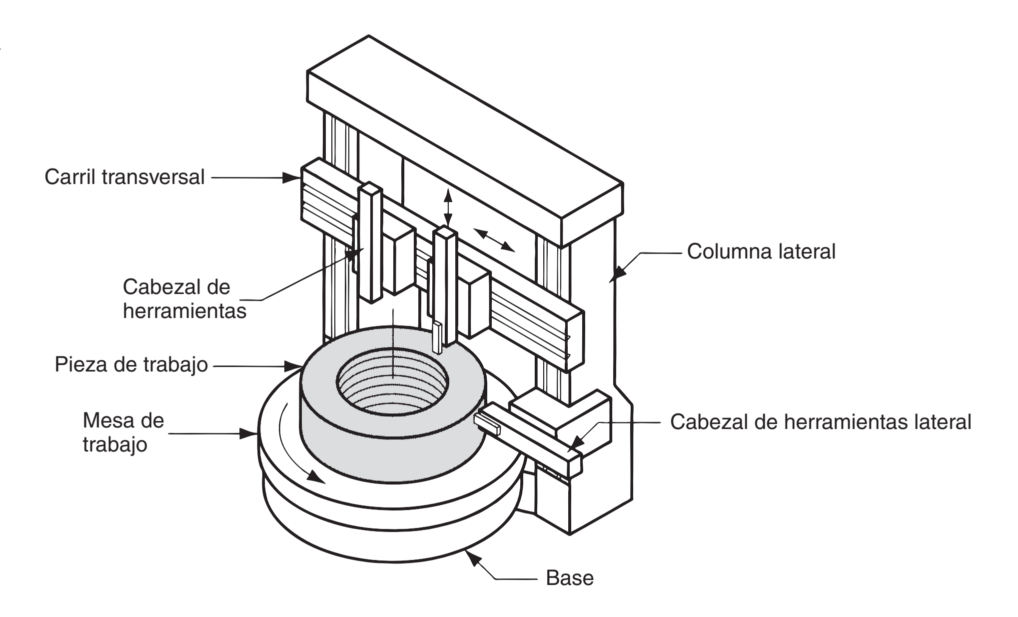


FIGURA 22.11 Barra perforadora hecha de carburo cementado (WC-Co) que usa insertos intercambiables de carburo cementado (cortesía de Kennametal Inc.).

uno o dos cabezales adicionales en las columnas laterales del bastidor para permitir el torneado en el diámetro exterior del trabajo.

Las cabezas portaherramientas usadas en una máquina de perforado vertical incluyen frecuentemente torretas para acomodar varias herramientas de corte. Esto hace difícil distinguir entre esta máquina y un ***torno revólver vertical*** (VTL por sus siglas en inglés). Algunos constructores de máquinas herramienta especifican que los VTL se usan para diámetros de trabajo de hasta 2.5 m (100 in), mientras que las VBM se usan para diámetros más grandes [6]. Las máquinas de perforado vertical también se aplican frecuentemente a trabajos especializados, mientras que los tornos revólver verticales se usan para la producción por lotes.

FIGURA 22.12 Máquina perforadora vertical.



22.2 TALADRADO Y OPERACIONES AFINES

El taladrado, figura 21.3*b*), es una operación de maquinado que se usa para crear agujeros redondos en una pieza de trabajo. Esto contrasta con el perforado descrito previamente, el cual solamente puede usarse para agrandar un agujero existente. El taladrado se realiza por lo general con una herramienta cilíndrica rotatoria, llamada ***broca*** (descrita en la sección 23.3.2), que tiene dos bordes cortantes en su extremo. La broca avanza dentro de la pieza de trabajo estacionaria para formar un agujero cuyo diámetro está determinado por el diámetro de la broca. El taladrado se realiza en una ***prensa taladradora***, aunque otras máquinas herramienta puedan ejecutar esta operación.

22.2.1 Condiciones de corte en el taladrado

La velocidad de corte en una operación de taladrado es la velocidad superficial en el diámetro exterior de la broca. Se especifica de esta forma por conveniencia, aunque casi todo el corte se realiza realmente a las velocidades más bajas cercanas al eje de rotación. Para fijar la velocidad deseada de corte en taladrado, es necesario determinar la velocidad de rotación de la broca por su diámetro. Si N representa las rev/min del husillo, entonces:

$$N = \frac{v}{\pi D} \tag{22.7}$$

donde v = velocidad de corte, mm/min (in/min); y D = diámetro de la broca, mm (in). En algunas operaciones de taladrado, la superficie de la pieza gira sobre una herramienta en reposo, pero se aplica la misma fórmula.

En el taladrado, el avance f se especifica en mm/rev (in/rev). Las velocidades recomendadas son aproximadamente proporcionales al diámetro de la broca; los avances más altos se logran con brocas de diámetro grande. Como generalmente existen dos bordes de corte en la punta de la broca, el espesor de la viruta no cortada (carga de viruta) que se toma en cada borde de corte es la mitad del avance. El avance puede convertirse a velocidad de avance si se utiliza la misma ecuación que en el torneado:

$$f_r = Nf \tag{22.8}$$

donde f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min).

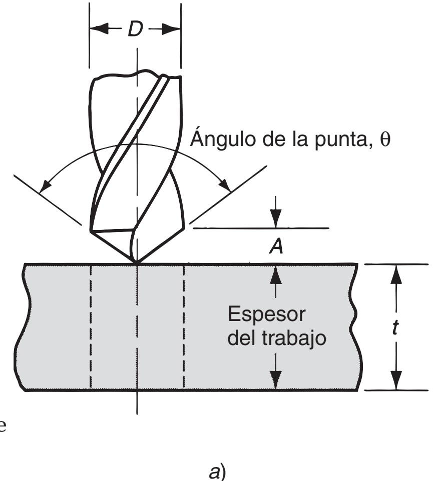
Los agujeros taladrados pueden ser agujeros completos o agujeros ciegos, figura 22.13. En los ***agujeros pasados***, la broca sale en el lado opuesto del trabajo; en los ***agujeros ciegos*** no es así. El tiempo de maquinado requerido para taladrar un agujero pasado se puede determinar con la fórmula siguiente:

$$T_m = \frac{t + A}{f_r} \tag{22.9}$$

donde T_m = tiempo de maquinado (taladrado), min; t = espesor del trabajo, mm (in); f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min); A = tolerancia de aproximación que toma en cuenta el ángulo de la punta de la broca, y representa la distancia que la broca debe avanzar dentro del trabajo antes de alcanzar el diámetro completo, figura 22.10*a*). Dicha tolerancia está determinada por

$$A = 0.5D \tan\left(90 - \frac{\theta}{2}\right) \tag{22.10}$$

donde A = tolerancia de aproximación, mm (in); y θ = ángulo de la punta de la broca.



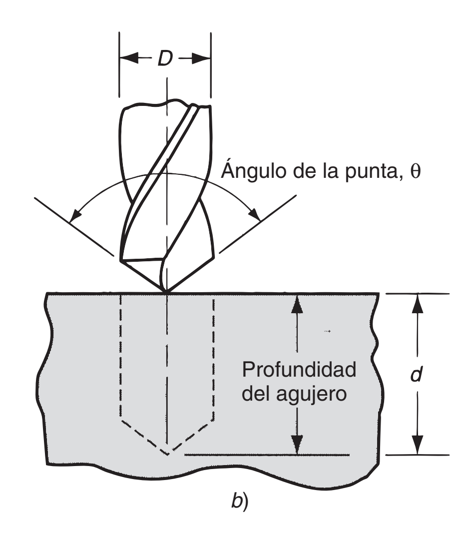


FIGURA 22.13 Dos tipos de agujeros: *a*) agujero pasado y *b*) agujero ciego.

En un agujero ciego la profundidad d se define como la distancia entre la superficie de trabajo y la "punta" del agujero, figura 22.13*b*). Por esta definición, el ángulo de tolerancia de la punta de la broca no afecta el tiempo para taladrar el agujero. Entonces, el tiempo de maquinado para un agujero ciego está dado por:

$$T_m = \frac{d}{f_r} \tag{22.11}$$

La velocidad de remoción de metal en el taladrado se determina como el producto de la sección transversal de la broca y la velocidad de avance:

$$R_{MR} = \frac{\pi D^2 f_r}{4} \tag{22.12}$$

Esta ecuación es válida solamente después de que la broca alcance el diámetro completo y excluye la aproximación de la broca al trabajo.

22.2.2 Operaciones relacionadas con el taladrado

Varias operaciones se relacionan con el taladrado. Dichas operaciones se muestran en la figura 22.14 y se describen en esta sección. La mayoría de las operaciones son posteriores al taladrado. Primero debe hacerse un agujero por taladrado y después modificarse por alguna de estas operaciones. El centrado y el refrenteado son excepciones a esta regla. Todas las operaciones usan herramientas rotatorias.

a) ***Escariado.*** Se usa para agrandar ligeramente un agujero, suministrar una mejor tolerancia en su diámetro y mejorar su acabado superficial. La herramienta se llama ***escariador*** y, por lo general, tiene ranuras rectas.

b) ***Roscado interior.*** Esta operación se realiza por medio de un ***machuelo*** y se usa para cortar una rosca interior en un agujero existente.

c) ***Abocardado.*** En el abocardado se produce un agujero escalonado en el cual un diámetro más grande sigue a un diámetro más pequeño parcialmente dentro del agujero. Se usa un agujero abocardado para asentar las cabezas de los pernos dentro de un agujero, de manera que no sobresalgan de la superficie.

d) ***Avellanado.*** Es una operación similar al abocardado salvo que el escalón en el agujero tiene forma de cono para tornillos y pernos de cabeza plana.

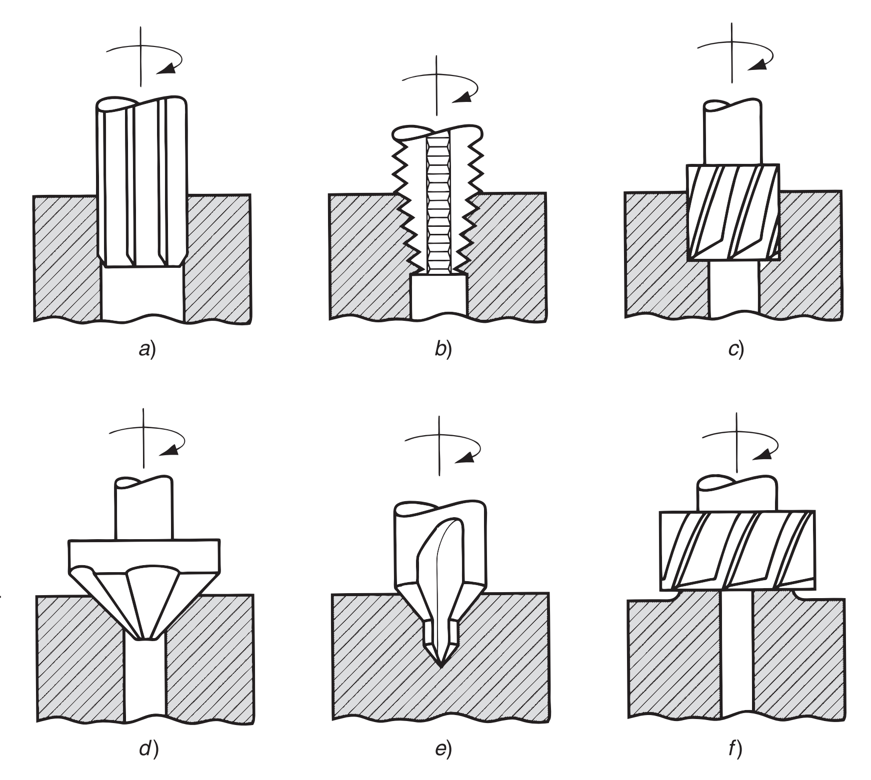


FIGURA 22.14 Operaciones de maquinado rela cionadas con el taladrado: *a*) escariado, *b*) roscado interior, *c*) abocardado, *d*) avellanado, e) centrado y *f*) refrenteado.

e) ***Centrado.*** También llamado taladrado central, esta operación taladra un agujero inicial para establecer con precisión el lugar donde se taladrará el siguiente agujero. La herramienta se llama ***broca de centros***.

f) ***Refrenteado.*** Es una operación similar al fresado que se usa para suministrar una superficie maquinada plana en la pieza de trabajo en un área localizada.

22.2.3 Prensas taladradoras

La prensa taladradora o taladro es la máquina estándar para taladrar. Hay varios tipos de prensas taladradoras, de las cuales la básica es la vertical, figura 22.15. El ***taladro vertical*** se mantiene sobre el piso y está formado por una mesa para sostener la pieza de trabajo, un cabezal de taladro con un husillo mecanizado para la broca, y una base y columna para soporte. Una prensa similar, pero más pequeña, es el ***taladro de banco***, el cual se monta sobre una mesa o un banco en lugar de pararse sobre el piso.

El ***taladro radial***, figura 22.16, es una prensa taladradora grande diseñada para cortar agujeros en piezas grandes. Tiene un brazo radial a lo largo del cual se puede mover y ajustarse el cabezal del taladro. Por tanto, el cabezal puede ponerse en posición a lo largo del brazo en lugares que son significativamente distantes de la columna, lo cual permite acomodar piezas de trabajo grandes.

El ***taladro múltiple*** es una prensa taladradora que consiste básicamente en una serie de dos a seis taladros verticales conectados en un arreglo en línea. Cada husillo se acciona y opera en forma independiente, pero comparten una mesa de trabajo común, de manera que se pueden realizar operaciones relacionadas de taladrado en serie (por ejemplo, centrado, taladrado, escariado y roscado interior) deslizando simplemente la pieza de trabajo sobre la mesa de trabajo de un husillo al siguiente. Una máquina relacionada es el ***taladro de husillos múltiples***, en la cual están conectados varios husillos para taladrar múltiples agujeros simultáneamente en una pieza de trabajo.

Existen además las ***prensas taladradoras de control numérico*** para controlar el posicionado de los agujeros en las piezas de trabajo. Estas prensas taladradoras están frecuentemente

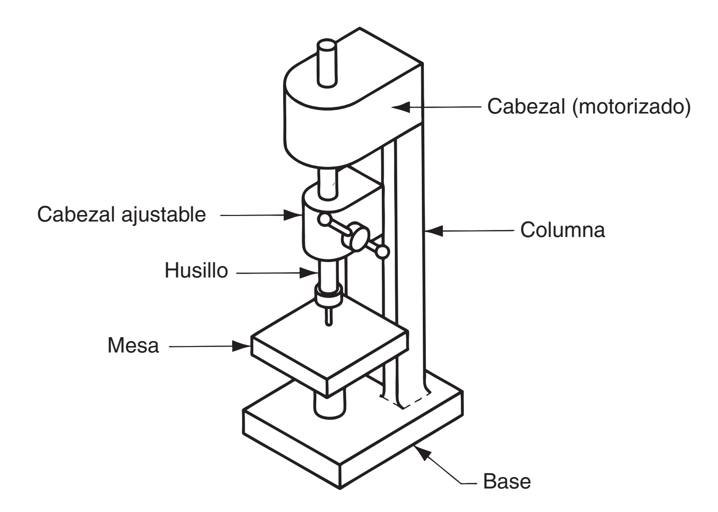


FIGURA 22.15 Prensa taladradora vertical.

FIGURA 22.16 Prensa taladradora radial (cortesía de Willis Machinery and Tools).

equipadas con torretas para sostener herramientas múltiples, que pueden seleccionarse bajo control de un programa de control numérico. Se usa el término ***taladro revólver*** de control numérico para este tipo de máquinas.

La sujeción del trabajo en una prensa taladradora se logra fijando la pieza de trabajo en un tornillo de banco, sujetador o guía. Un ***tornillo de banco*** es un dispositivo de sujeción de propósito general que posee dos mordazas que aprietan el trabajo en posición. ***Un sujetador*** es un dispositivo que fija el trabajo diseñado por lo general específicamente para la pieza de trabajo particular. El sujetador puede diseñarse para lograr mayor precisión en el posicionado de la pieza respecto a la operación de la máquina, mayores velocidades de proyección y mayor conveniencia para el operador. Una ***guía*** es un dispositivo sujetador del trabajo que se diseña también especialmente para la pieza de trabajo. La característica distintiva entre la guía y el sujetador es que la guía suministra un medio para guiar la herramienta durante la operación de taladrado. Un sujetador no posee esta característica de guía. Una guía que se usa para taladrado se llama ***guía de taladro***.

22.3 FRESADO

El ***fresado*** es una operación de maquinado en la cual se hace pasar una pieza de trabajo enfrente de una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples bordes o filos cortantes (en algunos casos raros se usa una herramienta con un solo filo cortante llamado ***fresa perfilada simple***). El eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección de avance. La orientación entre el eje de la herramienta y la dirección del avance es la característica que distingue al fresado del taladrado. En el taladrado, la herramienta de corte avanza en dirección paralela a su eje de rotación. La herramienta de corte en fresado se llama ***fresa o cortador para fresadora*** y los bordes cortantes se llaman dientes. La máquina herramienta que ejecuta tradicionalmente esta operación es una ***fresadora***.

La forma geométrica creada por el fresado es una superficie plana. Se pueden crear otras formas mediante la trayectoria de la herramienta de corte o la forma de dicha herramienta. Debido a la variedad de formas posibles y a sus altas velocidades de producción, el fresado es una de las operaciones de maquinado más versátiles y ampliamente usadas.

El fresado es una ***operación de corte interrumpido***; los dientes de la fresa entran y salen del trabajo durante cada revolución. Esto interrumpe la acción de corte y sujeta los dientes a un ciclo de fuerza de impacto y choque térmico en cada rotación. El material de la herramienta y la forma del cortador deben diseñarse para soportar estas condiciones.

22.3.1 Tipos de operaciones de fresado

Hay dos tipos básicos de operaciones de fresado, como se muestra en la figura 22.17: *a*) fresado periférico y *b*) fresado frontal.

Fresado periférico En el ***fresado periférico***, también llamado ***fresado plano***, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador. En la figura 22.18 se muestran varios tipos de fresado periférico: *a*) ***fresado de placa***, la forma básica de fresado periférico en la cual el ancho de la fresa se extiende más allá de la pieza de trabajo en ambos lados; *b*) ***ranurado***, también llamado ***fresado de ranuras***, en el cual el ancho de la fresa es menor que el ancho de la pieza de trabajo, creando una ranura en el trabajo; cuando la fresa es muy

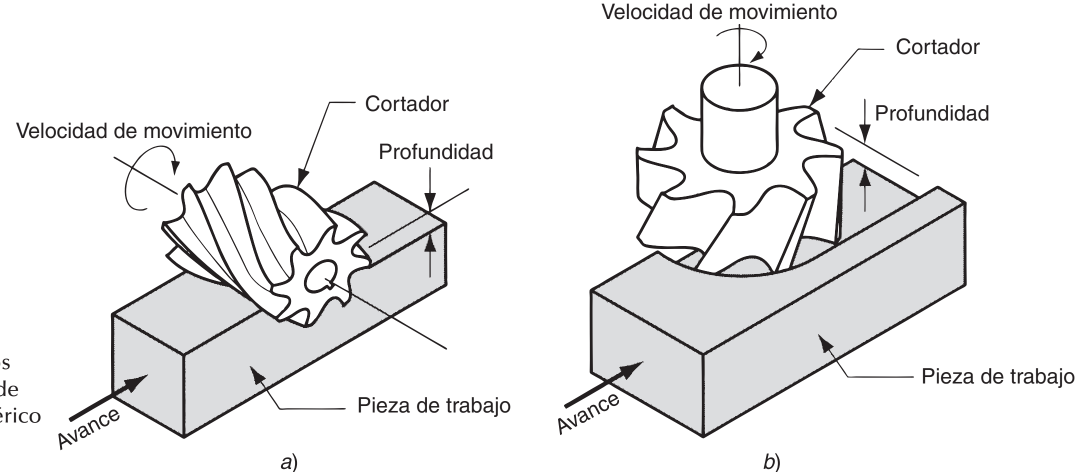


FIGURA 22.17 Dos tipos básicos de la operación de fresado: *a*) fresado periférico o de dientes finos y *b*) fresado frontal.

delgada se puede usar esta operación para tallar ranuras angostas o para cortar una pieza de trabajo en dos, llamado ***fresado aserrado***; *c*) ***fresado lateral***, en el cual la fresa maquina el lado de una pieza de trabajo; y *d*) ***fresado paralelo simultáneo***, el cual es el mismo que el fresado natural, excepto porque el corte tiene lugar en ambos lados del trabajo.

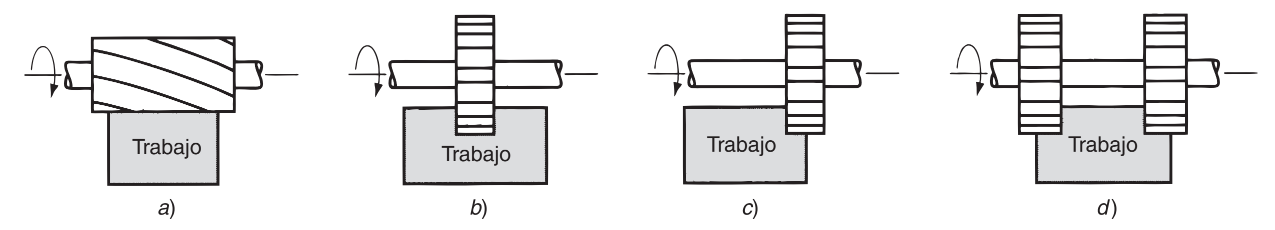
En el fresado periférico hay dos direcciones opuestas de rotación que puede tener la fresa respecto al trabajo. Estas direcciones distinguen dos formas de fresado: fresado ascendente y fresado descendente, que se ilustran en la figura 22.19. En el ***fresado ascendente***, también llamado ***fresado convencional***, la dirección del movimiento de los dientes de la fresa es opuesto a la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es decir, cortan "contra el avance". En el ***fresado descendente***, también llamado ***fresado tipo escalamiento***, la dirección del movimiento de la fresa es la misma que la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es un fresado "con el avance".

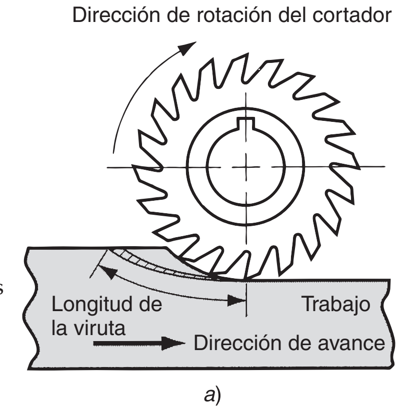
La configuración geométrica relativa de estas dos formas de fresado tiene sus diferencias en las acciones de corte. En el fresado ascendente, la viruta formada por cada diente del cortador comienza muy delgada y aumenta su espesor durante el paso del diente. En el fresado descendente, cada viruta empieza gruesa y se reduce a través del corte. La longitud de la viruta en el fresado descendente es menor que en el fresado ascendente (en la figura, la diferencia está exagerada para mayor comprensión). Esto significa una reducción en el tiempo de trabajo por volumen de material cortado, lo cual tiende a incrementar la vida de la herramienta en el fresado descendente.

La dirección de la fuerza de corte es tangencial a la periferia de la fresa para los dientes que están enganchados en el trabajo. En el fresado ascendente hay una tendencia a levantar la pieza de trabajo al salir los dientes del cortador del material. En el fresado descendente la dirección de la fuerza de corte es hacia abajo, y por esa causa el trabajo se mantiene contra la mesa de la máquina de fresado.

Fresado en la cara o fresado frontal En el ***fresado frontal***, el eje de la fresa es perpen dicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta cortando las orillas, tanto en el

FIGURA 22.18 Fresado periférico: *a*) fresado de placa, *b*) ranurado, *c*) fresado lateral y *d*) fresado paralelo simultáneo.





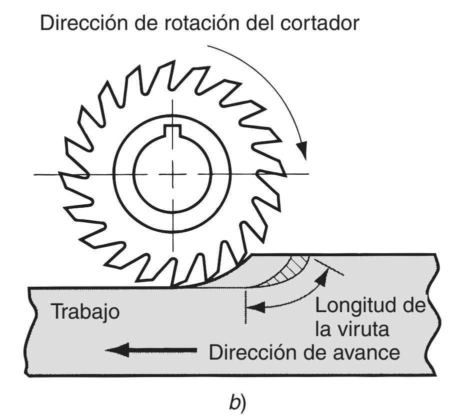


FIGURA 22.19 Dos formas de fresado con una fresa de 20 dientes: *a*) fresado ascendente y *b*) fresado descendente.

extremo como fuera de la periferia de la fresa. De igual manera que en el fresado periférico, también en el fresado frontal existen diversas formas; varias de ellas se ilustran en la figura 22.20: *a*) ***fresado frontal convencional***, en el que el diámetro de la fresa es más grande que el ancho de la pieza de trabajo, de tal manera que la fresa sobrepasa al trabajo en ambos lados; *b*) ***fresado frontal parcial***, en el que la fresa sobrepasa al trabajo solamente en un lado; *c*) ***fresado terminal***, en el cual el diámetro de la fresa es menor que el ancho del trabajo, de manera que se corta una ranura dentro de la pieza; *d*) ***fresado de perfiles*** es una forma de fresado terminal en el cual se corta una pieza plana de la periferia; *e*) ***fresado de cavidades***, otra forma de fresado terminal usada para fresar cavidades poco profundas en piezas planas; *f*) ***fresado de contorno superficial***, en el cual una fresa con punta de bola (en lugar de una fresa cuadrada) se hace avanzar hacia delante y hacia atrás, y hacia un lado y otro del trabajo, a lo largo de una trayectoria curvilínea a pequeños intervalos para crear una superficie tridimensional. Se requiere el mismo control básico para maquinar los contornos de moldes y troqueles en cuyo caso esta operación se llama ***tallado o contorneado de troqueles***.

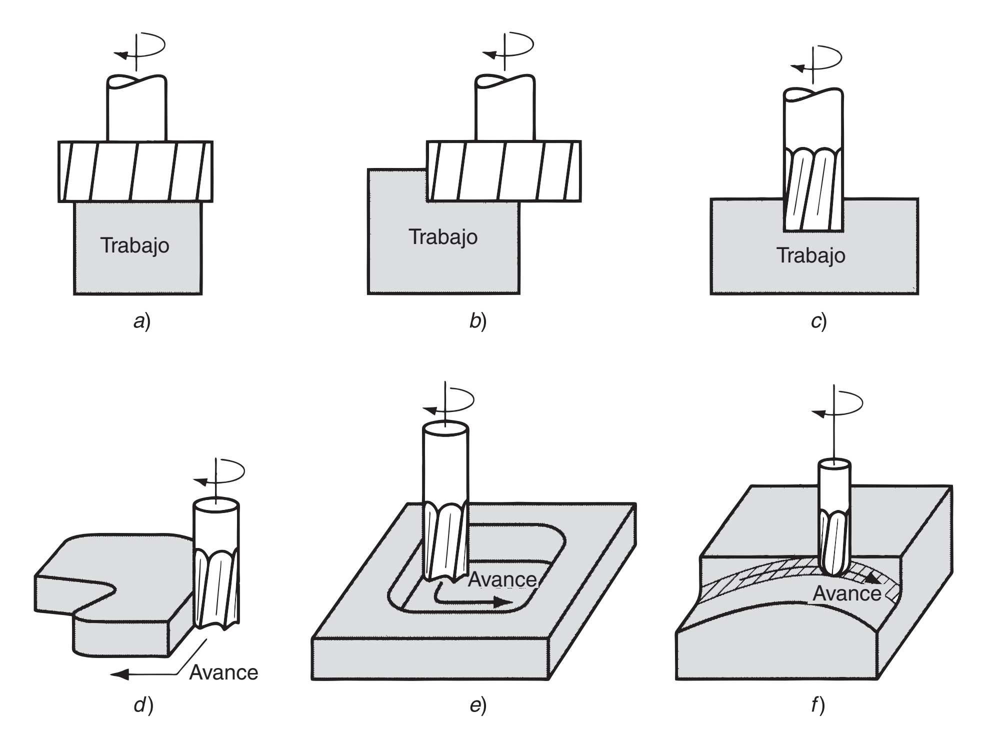


FIGURA 22.20 Fresado frontal: *a*) fresado frontal convencional, *b*) fresado frontal parcial, *c*) fresado terminal, *d*) fresado de perfiles, *e*) fresado de cavidades y *f*) fresado de contorno superficial.

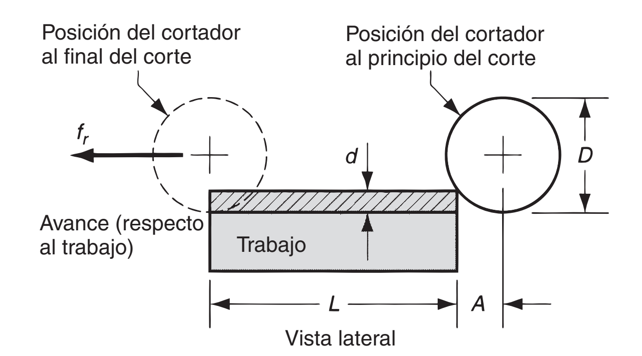


FIGURA 22.21 Fresado de placa (periférico) que muestra la entrada de la fresa en la pieza de trabajo.

22.3.2 Condiciones de corte en fresado

La velocidad de corte se determina con el diámetro exterior de la fresa. Ésta se puede convertir a la velocidad de rotación del husillo usando una fórmula que por ahora debe ser familiar al lector:

$$N = \frac{v}{\pi D} \tag{22.13}$$

El avance f en fresado se determina por lo general como el avance por diente cortante, llamado ***carga de viruta***, y representa el tamaño de la viruta formada por cada filo de corte. Esto se puede convertir a velocidad de avance, tomando en cuenta la velocidad del husillo y el número de dientes en la fresa, como sigue:

$$f_r = N n_t f \tag{22.14}$$

donde f_r = velocidad de avance en mm/min (in/min); N = velocidad del husillo en rev/min; n_t = número de dientes en la fresa; y f = carga de viruta en mm/diente (in/diente).

La remoción de material en el fresado se determina usando el producto del área de la sección transversal del corte por la velocidad de avance. Por consiguiente, si una operación de fresado de una plancha corta una pieza de trabajo con ancho w a una profundidad d, la velocidad de remoción de material es

$$R_{MR} = w d f_r \tag{22.15}$$

Esto ignora la entrada inicial de la fresa antes de su enganche completo. La ecuación 22.15 se puede aplicar al fresado terminal, fresado lateral, fresado frontal y otras operaciones de fresado, haciendo los ajustes apropiados en el cálculo del área de la sección recta del corte.

El tiempo requerido para fresar una pieza de trabajo de longitud L debe tomar en cuenta la distancia de aproximación requerida para enganchar completamente la fresa. Se considera primero el caso del fresado de una plancha, figura 22.21. Para determinar el tiempo de ejecución de una operación de fresado de la plancha, la distancia de aproximación A para alcanzar la velocidad de corte completo se determina mediante

$$A = \sqrt{d(D - d)} \tag{22.16}$$

donde d = profundidad de corte, mm (in); y D = diámetro de la fresa, mm (in). El tiempo para fresar la pieza de trabajo T_m es por tanto,

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \tag{22.17}$$

Para el fresado frontal se acostumbra dejar para la aproximación la distancia A más una distancia O, de recorrido adicional. Hay dos casos posibles, como se muestra en la figura 22.22. En ambos casos, $A = O$. El primer caso es cuando la fresa se centra sobre

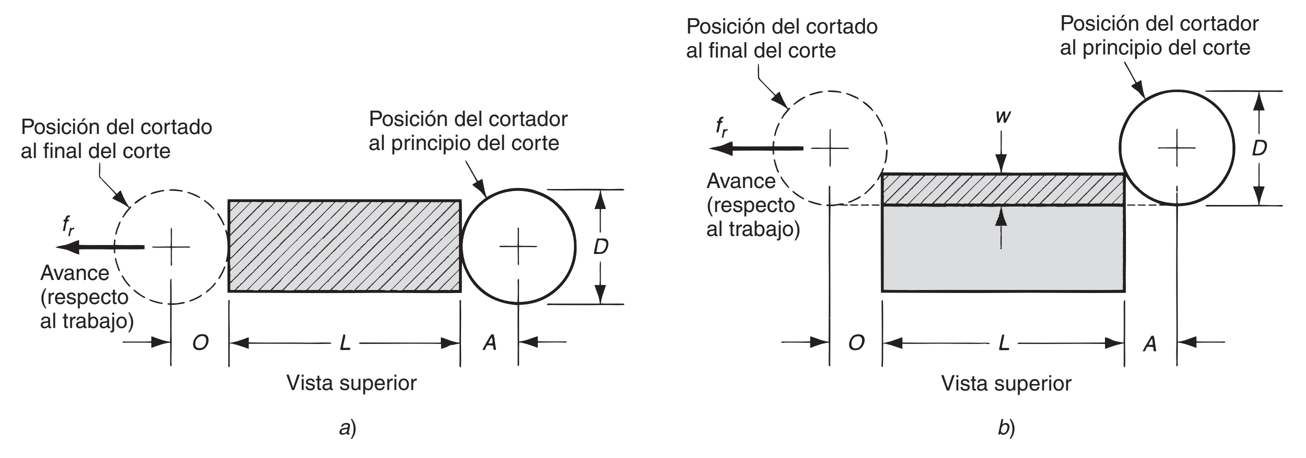


FIGURA 22.22 Fresado frontal en el que se muestran las distancias de aproximación y de recorrido adicional para dos casos: *a*) cuando el fresador está centrado sobre la pieza de trabajo y *b*) cuando el cortador está desplazado hacia un lado del trabajo.

la pieza de trabajo rectangular. En la figura 22.22*a*) es evidente que A y O son iguales a la mitad del diámetro del cortador.

Esto es,

$$A = O = \frac{D}{2} \tag{22.18}$$

donde D = diámetro de la fresa, mm (in).

El segundo caso es cuando la fresa sobresale a uno de los lados del trabajo, como se muestra en la figura 22.22*b*). En este caso, las distancias de aproximación y la distancia adicional están dadas por

$$A = O = \sqrt{w(D - w)} \tag{22.19}$$

donde w = ancho del corte, mm (in). Por tanto, el tiempo de maquinado en cada caso está dado por,

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \tag{22.20}$$

22.3.3 Máquinas fresadoras

Las máquinas fresadoras deben tener un husillo rotatorio para el cortador y una mesa para sujetar, poner en posición y hacer avanzar la pieza de trabajo. Varios diseños de máquinas herramienta satisfacen estos requerimientos. Para empezar, las máquinas fresadoras se pueden clasificar en horizontales o verticales. Una ***máquina fresadora horizontal*** tiene un husillo horizontal, y este diseño es adecuado para realizar el fresado periférico (por ejemplo, fresado de planchas, ranurado, y fresado lateral y paralelo simultáneos) sobre piezas de trabajo que tienen forma aproximadamente cúbica. ***Una máquina fresadora vertical*** tiene un husillo vertical, y esta orientación es adecuada para fresado frontal, fresado terminal, fresado de contorno de superficies y tallado de matrices sobre piezas de trabajo relativamente planas.

Aparte de la orientación del husillo, las máquinas fresadoras se clasifican dentro de los siguientes tipos: 1) rodilla y columna, 2) tipo bancada, 3) tipo cepillo, 4) fresas trazadoras y 5) máquinas fresadoras CNC.

La máquina fresadora de codo y columna (de consola) es la máquina herramienta básica para fresado. Deriva su nombre del hecho de que sus dos principales componentes son una ***columna*** que soporta el husillo y un ***codo*** (se parece a un codo humano) que soporta la mesa de trabajo. Se puede disponer de máquinas horizontales o verticales, como se ilustra

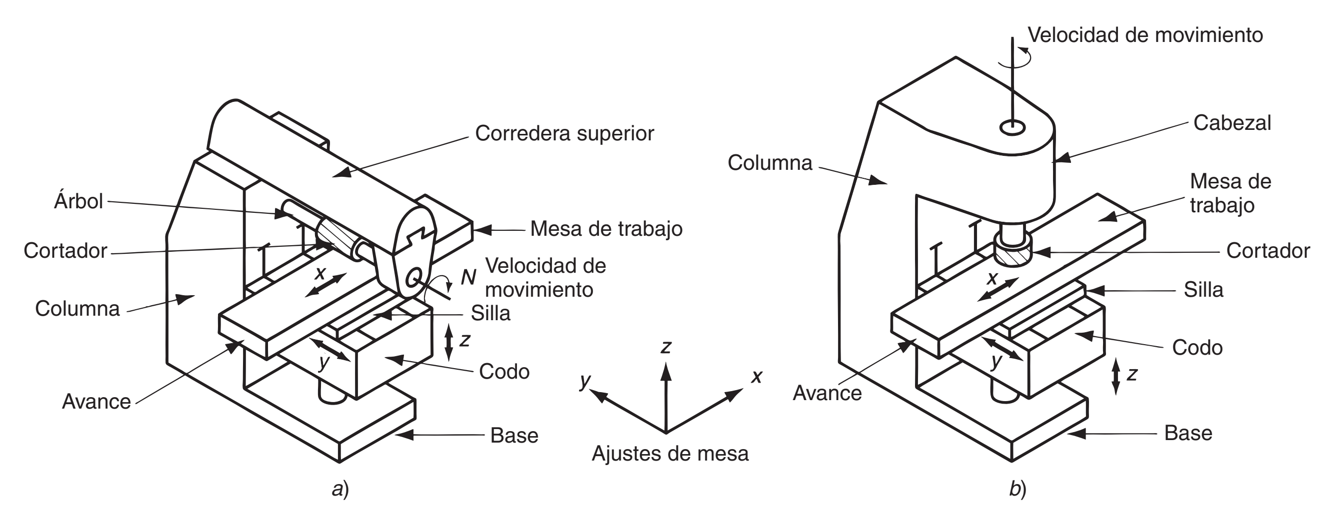


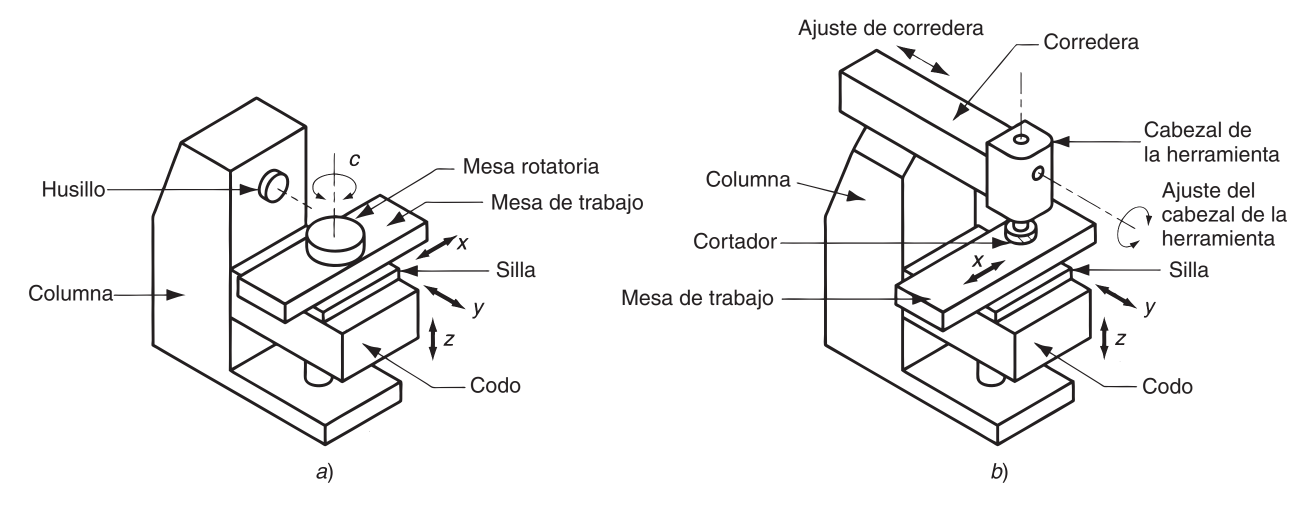
FIGURA 22.23 Dos tipos básicos de máquina fresadora de codo y columna: *a*) horizontal y *b*) vertical.

en la figura 22.23. En la versión horizontal, un árbol soporta por lo general a la fresa. El ***árbol*** es básicamente una flecha que sostiene el cortador y se acciona mediante el husillo principal. En las máquinas horizontales se provee un brazo para sostener el árbol. En las máquinas de codo y columna verticales los cortadores se pueden montar directamente en el husillo principal.

Una característica de las máquinas fresadoras de codo y columna que las hace tan versátiles es la capacidad de la mesa de trabajo para hacer avanzar el trabajo en cualquiera de los tres ejes x, y o z. La mesa de trabajo se puede mover en la dirección x, la silla se puede mover en la dirección y, y el codo se puede mover verticalmente para lograr el movimiento z.

Se puede identificar dos máquinas especiales de codo y columna. Una es la máquina fresadora ***universal***, figura 22.24*a*), la cual tiene una mesa que se puede girar en un plano horizontal (respecto a un eje vertical) a cualquier ángulo especificado. Esto facilita el corte de formas helicoidales y angulares sobre las piezas de trabajo. Otra máquina especial es la ***fresadora con corredera***, figura 22.24*b*), en la cual el cabezal de la herramienta que contiene el husillo se localiza sobre el extremo de una corredera horizontal; la corredera se puede ajustar hacia dentro y hacia fuera sobre la mesa de trabajo para dirigir la fresa hacia el trabajo. El cabezal de la herramienta se puede girar también para lograr una orientación

FIGURA 22.24 Tipos especiales de máquinas fresadoras de codo y columna: *a*) universal (se omiten la corredera superior, el árbol y el cortador, para mayor claridad) y *b*) tipo corredera.



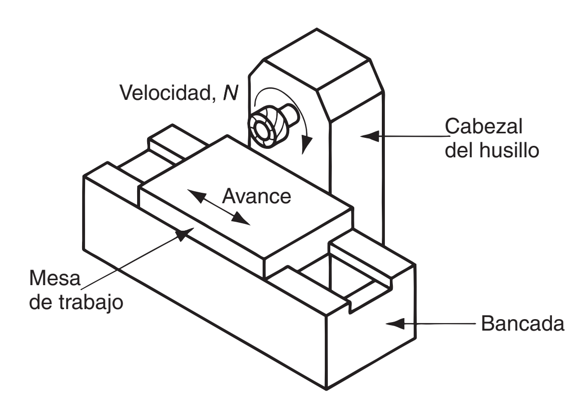


FIGURA 22.25 Máquina fresadora tipo cama simplex de husillo horizontal.

angular de la fresa hacia el trabajo. Estas características aportan considerable versatilidad en el maquinado de varias formas de trabajo.

Las ***fresadoras tipo bancada*** se diseñan para la producción en masa. Están construidas con mayor rigidez que las máquinas de codo y columna, y permiten las velocidades de avance más críticas y las profundidades de corte que se necesitan para las altas velocidades de remoción de material. La construcción característica de las máquinas fresadoras tipo bancada se muestra en la figura 22.25. La mesa de trabajo está montada directamente a la bancada de la máquina herramienta en lugar del tipo menos rígido de rodilla y columna. Esta construcción limita el posible movimiento longitudinal de la mesa para pasar el trabajo por delante de la fresa. La fresa está montada en un cabezal de husillo que puede ajustarse verticalmente a lo largo de la columna de la máquina. Las máquinas de bancada con un solo husillo se llaman máquinas ***simplex***, como se muestra en la figura 22.25, y están disponibles en modelos verticales u horizontales. Las fresadoras ***duplex*** usan dos cabezales de husillo, los cuales se posicionan por lo general horizontalmente sobre los lados opuestos de la bancada para realizar operaciones simultáneas durante un avance del trabajo. Las máquinas **triples** añaden un tercer husillo montado verticalmente sobre la bancada para darle mayor capacidad a la máquina.

Las ***máquinas tipo cepillo*** forman la categoría más grande de máquinas fresadoras. Su apariencia general y su construcción son las de un cepillo grande (figura 22.31); la diferencia es que en lugar del cepillado llevan a cabo el fresado. Por consiguiente, uno o más cabezales de fresado sustituyen a las herramientas de corte de una sola punta que se usan en los cepillos, y el movimiento del trabajo que pasa enfrente de la herramienta es un movimiento de velocidad de avance más que un movimiento de velocidad de corte. Las fresas tipo cepillo se construyen para maquinar piezas muy grandes. La mesa de trabajo y la cama de la máquina son pesadas y relativamente bajas, casi al ras del piso, y los cabezales fresadores se sostienen sobre una estructura puente que se extiende a través de la mesa.

La ***fresa trazadora,*** también llamada ***fresa perfiladora***, está diseñada para reproducir una geometría irregular de la pieza creada sobre una plantilla. Una sonda trazadora controlada por avance manual o automático sigue la plantilla, mientras el cabezal de fresado duplica la trayectoria de la sonda para maquinar la forma deseada. Las máquinas trazadoras se pueden dividir en los siguientes tipos: 1) ***trazado x-y,*** en la cual la plantilla es una forma plana con un contorno que se perfila usando un control de dos ejes, 2) ***trazado x-y-z***, en el cual la sonda sigue un patrón tridimensional usando un control de tres ejes.

Las fresadoras trazadoras se han usado para crear formas que no pueden ser generadas fácilmente por una acción de avance simple de la pieza de trabajo frente a la fresa. Sus aplicaciones incluyen el maquinado de moldes y troqueles. En años recientes, muchas aplicaciones que se hacían antes en fresas trazadoras se hacen ahora en máquinas fresadoras de control numérico computarizado (CNC).

Las ***máquinas fresadoras CNC*** son máquinas en las que la trayectoria de corte se controla por datos numéricos en lugar de plantillas físicas. Las máquinas fresadoras CNC están adaptadas especialmente para el fresado de perfiles, fresado de cavidades, fresado de contorno de superficies y operaciones de tallado de matrices, en las que se debe controlar simultáneamente dos o tres ejes de la mesa de trabajo. Normalmente se requiere el operador para cambiar las fresas y cargar y descargar las piezas de trabajo.

22.4 CENTROS DE MAQUINADO Y CENTROS DE TORNEADO

Un ***centro de maquinado*** es una máquina altamente automatizada capaz de realizar múltiples operaciones de maquinado en una instalación bajo CNC (control numérico computarizado) con la mínima intervención humana. Las operaciones típicas son aquellas que usan herramientas de corte rotatorio, como los cortadores y las brocas. Las siguientes características hacen de estos centros de maquinado una máquina productiva:

- ***Cambio automático de herramientas.*** Para cambiar de una operación de maquinado a la siguiente se debe cambiar las herramientas. Esto se hace en un centro de maquinado por medio de un programa de control numérico que controla a un cambiador automático de herramientas diseñado para intercambiar cortadores entre los husillos de la máquina y un ***tambor de almacenamiento de herramientas***. Las capacidades de estos tambores fluctúan por lo general de 16 a 80 herramientas de corte.
- ***Paletas transportadoras.*** Algunos centros de maquinado están equipados con dos o más transportadoras de paletas que pueden transferir automáticamente la pieza de trabajo al husillo de la máquina. Con dos paletas, el operador puede descargar las piezas previamente maquinadas y cargar las siguientes, mientras la máquina herramienta se encarga de maquinar la pieza en turno. Esto reduce el tiempo no productivo en la máquina.
- ***Posicionado automático de las piezas de trabajo.*** Muchos centros de maquinado tienen más de tres ejes. Uno de los ejes adicionales se diseña frecuentemente como una mesa rotatoria para poner la pieza en posición, formando un ángulo específico respecto al husillo. La mesa rotatoria permite a la herramienta de corte desempeñar el maquinado en cuatro lados de la pieza en una sola instalación.

Los centros de maquinado se clasifican en horizontales, verticales o universales. La designación se refiere a la orientación de husillo. Los centros de maquinado horizontal (HMC por sus siglas en inglés) maquinan normalmente piezas de forma cúbica donde la herramienta de corte tiene acceso a los cuatro lados verticales del cubo. Los centros de maquinado vertical (VMC, por sus siglas en inglés) están adaptados para piezas planas en los cuales la herramienta puede maquinar la superficie superior. Los centros de maquinado universal tienen cabezales de trabajo que pueden girar los ejes del husillo a cualquier ángulo entre el vertical y el horizontal, como se ilustra en la figura 22.26.

El éxito de los centros de maquinado CNC ha conducido al desarrollo de centros de torneado CNC. Un ***centro de torneado CNC*** moderno, figura 22.27, es capaz de desempeñar varias operaciones de torneado y operaciones relacionadas, torneado de contorno y secuenciado automático de herramientas, todas bajo control computarizado. Además, los centros de torneado sofisticado pueden realizar 1) calibrado de piezas de trabajo (verificación de las dimensiones clave después del maquinado), 2) monitoreo de las herramientas (sensores que indican cuando las herramientas están desgastadas), 3) cambio automático de herramientas cuando se desgastan, y además 4) cambio automático de piezas de trabajo al final de cada ciclo [14].

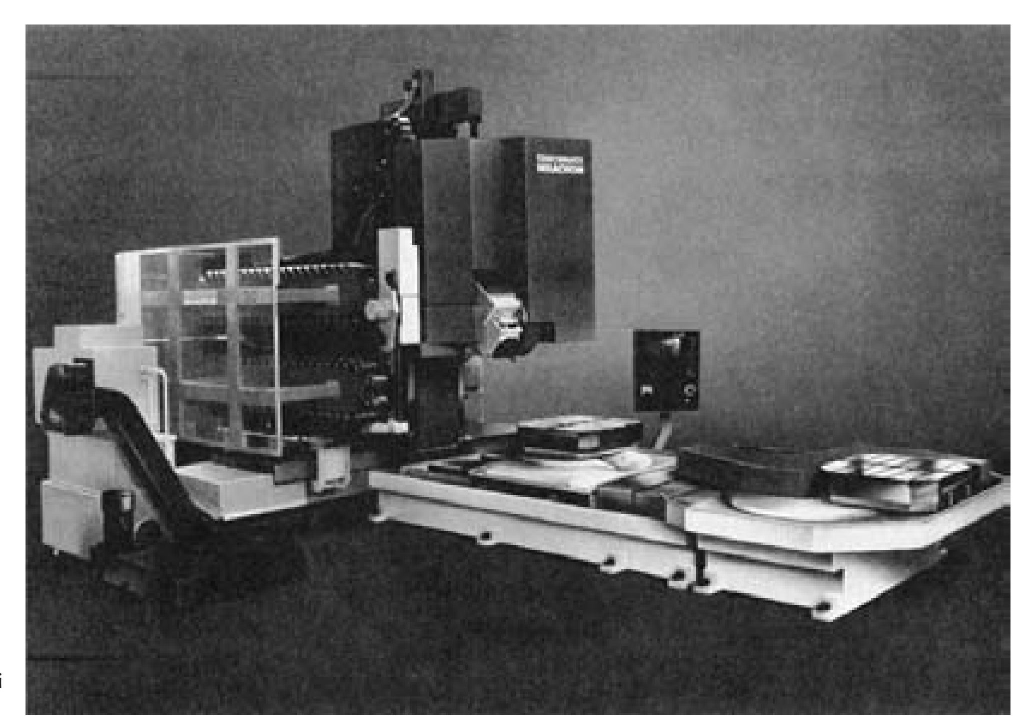
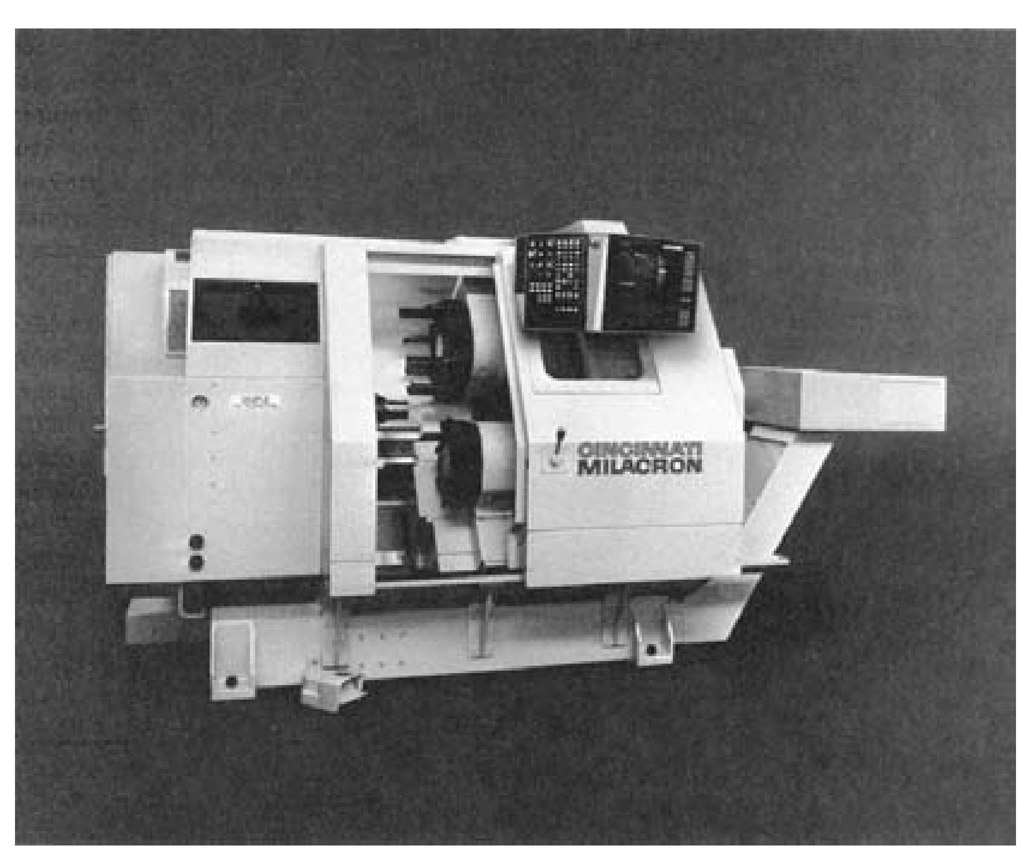


FIGURA 22.26 Centro de maquinado universal. La capacidad de orientar el cabezal de trabajo hace de ésta una máquina de cinco ejes (cortesía de Cincinnati Milacron).

FIGURA 22.27 Centro de torneado de cuatro ejes y CNC (cortesía de Cincinnati Milacron).



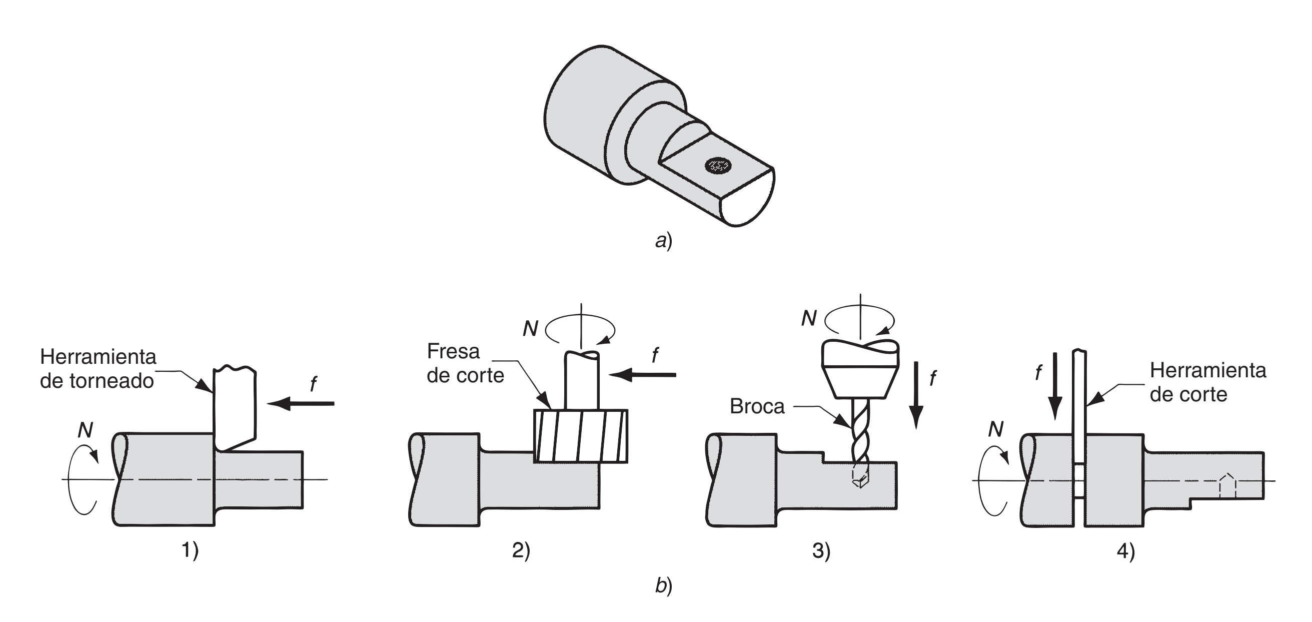


FIGURA 22.28 Operación de un centro de torneado y fresado: *a*) ejemplo de una pieza con superficies torneadas, fresadas y taladradas y *b*) secuencia de operaciones en un centro de torneado y fresado: 1) torneado de un segundo diámetro, 2) fresado plano en una posición angular programada de la pieza, 3) taladrado de un agujero con la pieza en la misma posición programada y 4) corte.

Otro tipo de máquina herramienta relacionada con los centros de maquinado y torneado es el ***centro de torno y fresa CNC***. Esta máquina tiene la configuración natural de un centro de torneado, y además puede posicionar una pieza de trabajo cilíndrica en un ángulo específico, de manera que una herramienta rotatoria de corte (por ejemplo, una fresa) pueda maquinar formas en la superficie externa de la pieza, como se ilustra en la figura 22.28. Un centro ordinario de torneado no tiene la capacidad de parar la pieza de trabajo en una posición angular definida y no tiene husillos para herramientas rotatorias.

Los avances actuales en cuanto a la tecnología de las máquinas herramienta han llevado al centro de torneado y fresado un paso adelante, al integrar las facilidades adicionales en una sola máquina. Dichas capacidades incluyen: 1) la combinación de fresado, taladrado y torneado con las operaciones de esmerilado, soldado e inspección, todas ellas en una sola máquina herramienta; 2) el uso simultáneo de múltiples husillos, tanto en una sola pieza de trabajo o en dos diferentes; y 3) la automatización de la función de manejo de piezas al incorporar robots industriales a las máquinas [2], [20]. A menudo se utilizan los términos ***máquinas multitareas*** y ***máquinas multifuncionales*** para identificar estos productos.

22.5 OTRAS OPERACIONES DE MAQUINADO

Además del torneado, fresado y taladrado, se deben incluir otras operaciones de maquinado en este estudio: 1) perfilado y cepillado, 2) brochado y 3) aserrado.

22.5.1 Perfilado y cepillado

El perfilado y el cepillado son operaciones similares ambas incluyen el uso de una herramienta de corte de una sola punta movida linealmente respecto a la pieza de trabajo. En el perfilado y cepillado convencionales, se crea una superficie plana y recta. La diferencia entre las dos operaciones se ilustra en la figura 22.29. En el perfilado, el movimiento de velocidad se obtiene al mover la herramienta de corte, mientras que en el cepillado se logra con el movimiento de la pieza de trabajo.

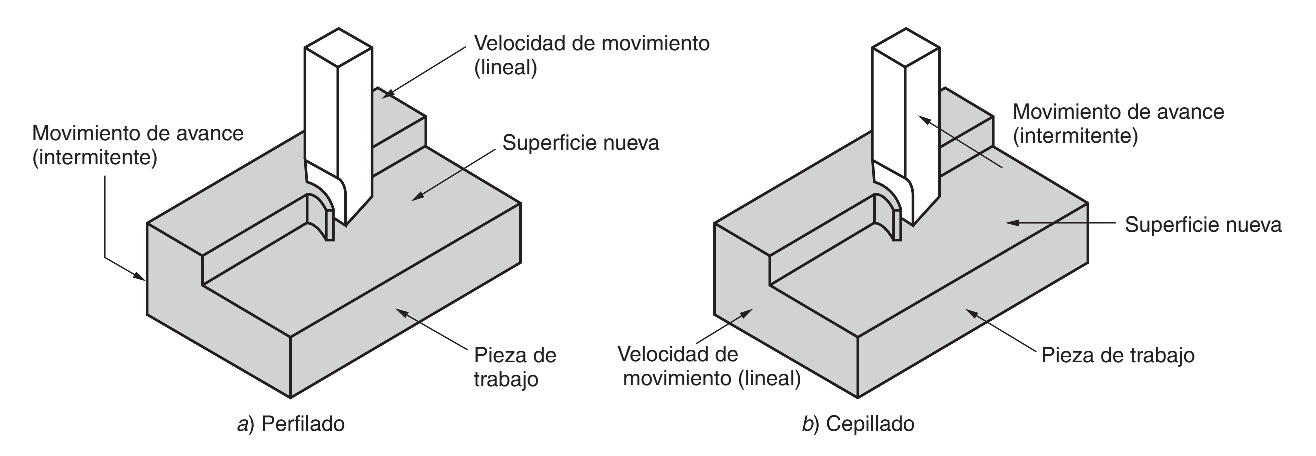
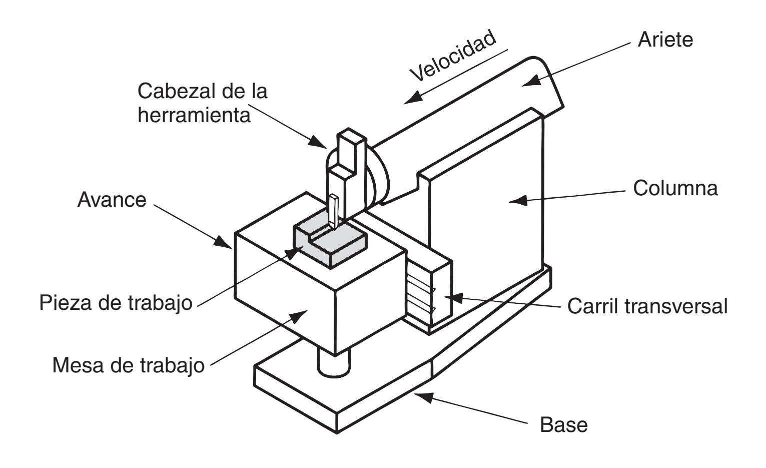


FIGURA 22.29 *a*) Perfilado y *b*) cepillado.

Las herramientas de corte usadas en el perfilado y cepillado son herramientas de una punta. A diferencia del torneado, en el perfilado y cepillado el corte se interrumpe, y sujeta a la herramienta a cargas de impacto a la entrada del trabajo. Además, estas máquinas herramienta están limitadas a bajas velocidades debido a su movimiento de vaivén. Estas condiciones dictan normalmente el uso de herramientas de corte de acero de alta velocidad.

Perfilado El perfilado se ejecuta en una máquina herramienta llamada ***perfiladora***, figura 22.30. Los componentes de la perfiladora incluyen un ***ariete*** o ***corredera*** que se mueve respecto a la ***columna*** para proveer el movimiento de corte, y una mesa de trabajo que sujeta la pieza y realiza el movimiento de avance. El movimiento del ariete es una carrera hacia delante para lograr el corte y una carrera de regreso durante la cual la herramienta se eleva ligeramente para librar el trabajo, e inmediatamente se coloca en posición para el siguiente paso. Al completar cada carrera de retorno, la mesa de trabajo avanza lateralmente respecto al movimiento del ariete a fin de hacer avanzar la pieza. El avance se especifica en mm/carrera (in/carrera). El mecanismo de transmisión para la corredera puede ser hidráulico o mecánico. La transmisión hidráulica tiene mayor flexibilidad para ajustar la longitud de la carrera y una velocidad más uniforme durante la carrera hacia delante, pero es más costosa que una unidad de transmisión mecánica. Tanto la transmisión hidráulica como la mecánica están diseñadas para lograr mayores velocidades en la carrera de retorno (sin corte) que sobre el avance hacia delante (cortante); por consiguiente, una mayor proporción del tiempo se dedica al corte.

FIGURA 22.30 Componentes de una perfiladora.



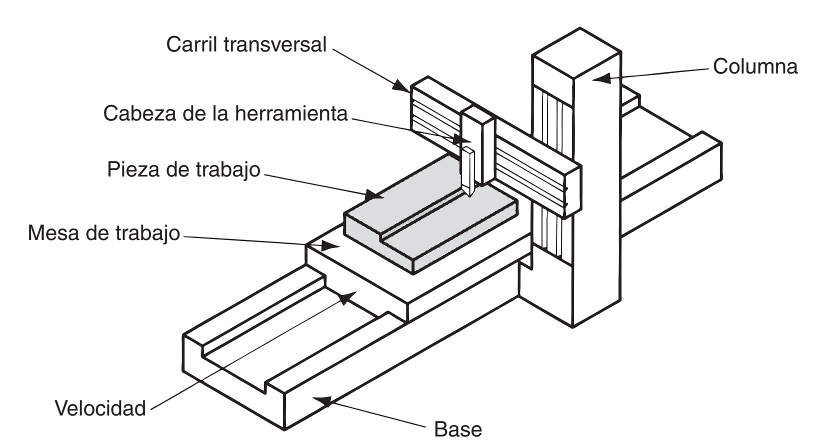


FIGURA 22.31 Cepillo de mesa abierto lateralmente.

Cepillado La máquina herramienta para cepillado se llama ***cepillo***. La velocidad de corte se logra por medio de una mesa de trabajo oscilante que mueve la parte posterior de una herramienta de corte de una punta. La construcción y la capacidad de movimiento de un cepillo permiten el maquinado de piezas mucho más grandes que las de una perfiladora. Los cepillos se pueden clasificar como cepillos de mesa abiertos lateralmente o cepillos de doble columna. Los ***cepillos de mesa abiertos lateralmente***, también conocidos como ***cepillos de una columna***, figura 22.31, tienen una sola columna que soporta el riel transversal sobre el cual se mueve el cabezal de la herramienta. Se puede montar otro cabezal de herramienta que avanza a lo largo de la columna vertical. Los cabezales de herramienta múltiple permiten más de un corte en cada paso. Al completarse cada carrera, cada cabezal de corte se mueve respecto al riel transversal (o columna) para lograr un movimiento de avance intermitente. La configuración del cepillo de mesa abierto lateralmente permite maquinar piezas de trabajo muy anchas.

Un ***cepillo de doble columna*** tiene dos columnas, una a cada lado de la cama y mesa de trabajo. Las columnas sostienen el riel transversal, sobre el cual se montan uno o más cabezales de herramienta. Las dos columnas proporcionan una estructura más rígida para la operación; sin embargo, las dos columnas limitan el ancho del trabajo que se puede manejar en esta máquina.

El perfilado y cepillado se pueden usar para maquinar otras superficies diferentes a las planas. La restricción es que las superficies deben ser rectas. Esto permite el tallado de canales, ranuras, dientes de engranes y otras formas, como las ilustradas en la figura 22.32. Para cortar algunas de estas formas, es necesario especificar configuraciones geométricas especiales diferentes a las herramientas estándar de una punta. De hecho, las herramientas especiales para maquinado se usan algunas veces para este fin. Un ejemplo importante es el ***formador de engranes***, un formador vertical diseñado especialmente para avance rotatorio y cabezal de herramienta sincronizada para generar los dientes de los engranes rectos o cilíndricos.

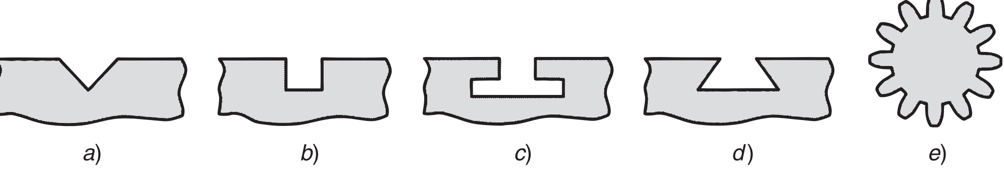


FIGURA 22.32 Tipos de perfiles que se pueden cortar por perfilado y cepillado: *a*) canal en V, *b*) canal cuadrado, *c*) ranura en T, *d*) ranura cola de milano y *e*) dientes de engrane.

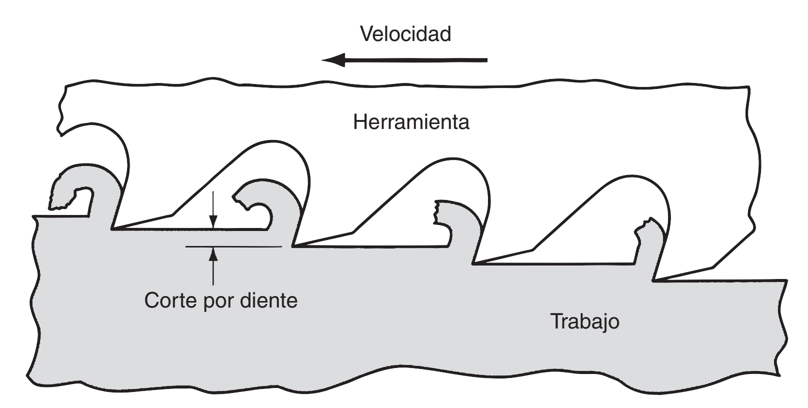


FIGURA 22.33 Operación de brochado.

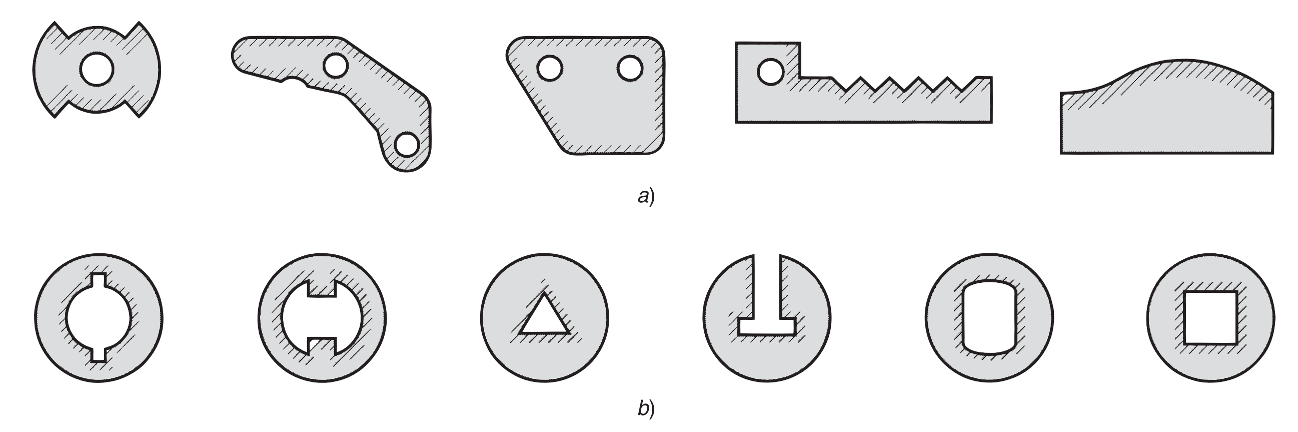
22.5.2 Brochado

El escariado se realiza usando una herramienta de corte de dientes múltiples que se mueve linealmente en relación con el trabajo en dirección al eje de la herramienta, como se muestra en la figura 22.33. La herramienta de corte se llama ***brocha***, y la máquina herramienta se llama ***máquina brochadora***. Éste es un método de maquinado altamente productivo en algunos trabajos que usan el brochado. Las ventajas incluyen buen acabado de la superficie, tolerancias estrechas y una gran variedad de formas posibles de trabajo. Debido a la complicada forma geométrica de la brocha y a que frecuentemente se diseña a la medida, la herramienta es costosa.

Hay dos tipos principales de brochado: externo (también llamado brochado de superficie) e interno. El ***brochado externo*** se ejecuta sobre la superficie externa del trabajo para crear ciertas formas de la sección transversal en la superficie. La figura 22.34*a*) muestra algunas posibles secciones transversales que pueden formarse por brochado externo. El ***brochado interno*** se ejecuta en la superficie interna de un agujero de la pieza. Por consiguiente, en la pieza de trabajo debe estar presente el agujero inicial, de manera que se pueda insertar la brocha al principio de la carrera de brochado. La figura 22.34*b*) indica algunas de las formas que pueden producirse por brochado interno.

La función básica de la ***máquina brochadora*** es suministrar un movimiento lineal y preciso de la herramienta que pasa delante de la posición del trabajo estacionario, pero hay varias formas en que esto puede hacerse. La mayoría de las máquinas brochadoras se puede clasificar como máquinas verticales u horizontales. La ***máquina brochadora vertical*** está diseñada para mover el brochado a lo largo de una trayectoria vertical, mientras que la ***máquina brochadora horizontal*** tiene una trayectoria horizontal. La mayoría de las máquinas de brochado jala la brocha por delante del trabajo. Sin embargo, hay excepciones para esta acción de tirado. Una de ellas es un tipo relativamente simple llamado ***prensa de***

FIGURA 22.34 Formas de trabajo que se pueden cortar por: *a*) brochado externo y *b*) brochado interno. El achurado indica las superficies brochadas.



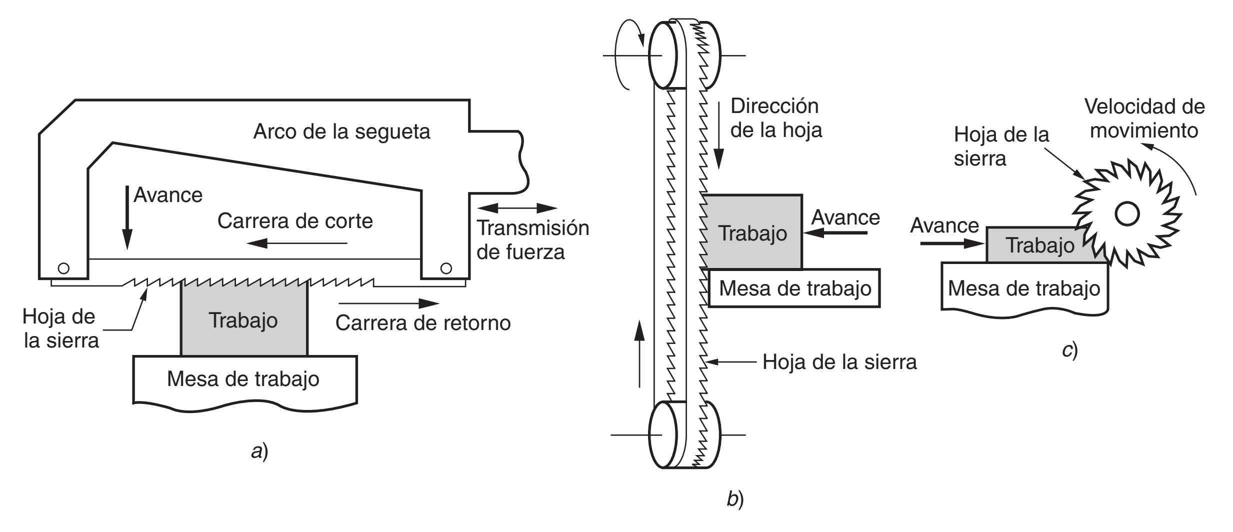


FIGURA 22.35 Tres tipos de operaciones de aserrado: *a*) con segueta motorizada, *b*) con sierra de cinta (vertical) y *c*) con sierra circular.

brochado que se usa solamente para el brochado interno, la cual empuja la herramienta a través de la pieza de trabajo. Otra excepción es la ***máquina de brochado continuo***, en la cual se fija la pieza de trabajo a un transportador sin fin que se mueve delante de una brocha estacionaria. Debido a su operación continua, esta máquina se puede usar solamente para brochado superficial.

22.5.3 Aserrado

El aserrado es un proceso en el que se corta una hendidura angosta dentro de la pieza de trabajo por medio de una herramienta que tiene una serie de dientes estrechamente espaciados. El aserrado se usa normalmente para separar una pieza de trabajo en dos piezas o para cortar un trozo no deseado de la pieza. A estas operaciones se les llama frecuentemente operaciones de ***separación***. El aserrado es un proceso importante de manufactura, ya que muchas fábricas requieren de operaciones de corte en algunos puntos de su secuencia de manufactura.

En la mayoría de las operaciones de aserrado el trabajo se mantiene estático y la ***hoja de la sierra*** se mueve respecto a él. Hay tres tipos básicos de aserrado, como se muestra en la figura 22.35, de acuerdo con el tipo de movimiento de la sierra: *a*) con segueta, *b*) con sierra de cinta y *c*) con sierra circular.

El ***corte con segueta***, figura 22.35*a*), involucra un movimiento lineal de vaivén de la segueta contra el trabajo. Este método de aserrado se usa frecuentemente en operaciones de trozado. El corte se realiza solamente en la carrera hacia delante de la segueta. Debido a esta acción de corte intermitente, el corte con segueta es por naturaleza menos eficiente que los otros métodos de aserrado, ya que los otros dos son continuos. Una ***segueta*** es una herramienta delgada y recta, con dientes cortantes en uno de sus bordes. El corte con segueta se puede hacer en forma mecánica o manual. La ***segueta mecanizada*** tiene un mecanismo de transmisión en el que la segueta opera a la velocidad deseada; también se aplica una velocidad dada de avance o presión de aserrado.

El ***aserrado con cinta*** implica un movimiento lineal continuo que utiliza una ***sierra de cinta*** hecha en forma de banda flexible sin fin con dientes en uno de sus bordes. La máquina aserradora es una ***sierra de cinta***, que tiene un mecanismo de transmisión con poleas para mover y guiar continuamente la sierra de cinta delante del trabajo. Las sierras de cinta se clasifican en verticales u horizontales. La designación se refiere a la dirección del movimiento de la sierra de cinta durante el corte. Las sierras de cintas verticales se usan para cortar trozos y realizar otras operaciones, como el contorneado y el ranurado. El ***calado*** en una sierra de cinta implica el corte del perfil de una pieza perfilada de material plano. El ***ranurado*** es el corte de una ranura delgada dentro de la pieza, una operación para la cual

la sierra de cinta es adecuada. El contorneado y el ranurado son operaciones en las que el trabajo avanza dentro de la sierra de cinta.

Las máquinas verticales de sierra de cinta pueden operarse ya sea manualmente por un operador que guía y hace avanzar el trabajo manualmente sobre la sierra de cinta, o automáticamente, en la cual el trabajo avanza mecánicamente a través de la sierra. Algunas innovaciones recientes en el diseño de sierras de cinta han permitido el uso del CNC para realizar el contorneado de formas complejas. Algunos detalles de la operación de la sierra de cinta se ilustran en la figura 22.35*b*). Las sierras de cinta horizontales se usan normalmente en operaciones de corte como alternativas del corte con segueta mecanizada.

La ***sierra circular***, figura 22.35*c*), usa una sierra circular giratoria para suministrar el movimiento continuo de la herramienta frente al trabajo. El corte con sierra circular se usa frecuentemente para cortar barras largas, tubos y formas similares a una longitud específica. La acción de corte es similar a una operación de fresado de ranuras, excepto porque la sierra circular es más delgada y contiene más dientes que una fresa ranuradora. Las máquinas de sierra circular tienen husillos motorizados que hacen girar la sierra y un mecanismo de avance que conduce la sierra giratoria dentro del trabajo.

Dos operaciones relacionadas con la sierra circular son el corte abrasivo y el aserrado por fricción. En el ***corte abrasivo*** se usa un disco abrasivo para ejecutar las operaciones de corte sobre materiales duros que serían difíciles de aserrar con una sierra convencional. En el ***aserrado por fricción***, un disco de acero gira contra el trabajo a una velocidad muy alta y produce el calor de fricción necesario para ablandar el material lo suficiente y permitir la penetración del disco a través del trabajo. Las velocidades de corte en ambas operaciones son mucho más rápidas que las de la sierra circular.

22.6 MAQUINADO DE ALTA VELOCIDAD

Una tendencia muy constante a través de la historia del maquinado de metales ha sido el uso de velocidades de corte cada vez más elevadas. En años recientes, se ha presentado un gran interés en esta área debido a su potencial para alcanzar volúmenes de producción más elevados, tiempos y costos más reducidos y una mejor calidad de las piezas. En su definición más simple, el ***maquinado a alta velocidad*** (HSM) significa utilizar velocidades de corte que sean significativamente más elevadas que las utilizadas en las operaciones de maquinado convencional. En la tabla 22.1 se presenta algunos ejemplos de valores de velocidades de corte para corte convencional y de alta velocidad, de acuerdo con los datos recabados por Kennametal, Inc.[1]

Se han creado otras definiciones de HSM para tratar con una amplia variedad de materiales de trabajo y para herramientas que se utilizan en el maquinado. Una definición popular de HSM es la ***relación DN***, el diámetro de la broca (mm) multiplicado por la velocidad máxima del husillo (rev/min). En el maquinado de alta velocidad, la relación DN típica es entre 500 000 y 1 000 000. Esta definición permite que cojinetes de mayor diámetro se ubiquen dentro del rango de HSM, a pesar de que operen a velocidades rotacionales menores que los cojinetes más pequeños. Las velocidades de husillo HSM típicas se encuentran en el rango de entre 8 000 y 35 000 rpm, aunque algunos husillos en la actualidad están diseñados para girar a 100 000 rpm.

Otra definición de HSM se basa en el cociente de los caballos de fuerza y la velocidad máxima del husillo, también conocida como ***relación hp/rpm***. Las máquinas herramienta convencionales usualmente tienen una relación hp/rpm más elevada que las máquinas equipadas para el maquinado a alta velocidad. Mediante esta medida, la línea divisoria entre el maquinado convencional y el HSM es de alrededor de 0.005 hp/rpm. Por lo tanto, el maquinado a alta velocidad incluye husillos de 50 hp capaces de girar a 10 000 rpm (0.005 hp/rpm) y husillos de 15 hp capaces de girar a 30 000 rpm (0.0005 hp/rpm).

Otras definiciones se enfocan en velocidades de producción más elevadas y tiempos más reducidos, en lugar de basarse en la funcionalidad de la velocidad del husillo. En este

[1]Kennametal, Inc. es una fabricante líder en máquinas para corte.

TABLA 22.1 Tabla comparativa de las velocidades de corte utilizadas en el maquinado convencional versus el de alta velocidad para determinados materiales de trabajo.

	Herramientas sólidas (fresas escariadoras, taladros)[a]				Herramientas indexables (molinos frontales)[a]			
	Velocidad convencional		Velocidad alta de corte		Velocidad convencional		Velocidad alta de corte	
Material de trabajo	m/min	ft/min	m/min	ft/min	m/min	ft/min	m/min	ft/min
Aluminio	300+	1 000+	3 000+	10 000+	600+	2 000+	3 600+	12 000+
Acero fundido, suave	150	500	360	1 200	360	1 200	1 200	4 000
Acero fundido, dúctil	105	350	250	800	250	800	900	3 000
Acero, maquinado libre	105	350	360	1 200	360	1 200	600	2 000
Acero, aleación	75	250	250	800	210	700	360	1 200
Titanio	40	125	60	200	45	150	99	300

Fuente: Kennametal, Inc. [3].

[a] Las herramientas sólidas están hechas de una pieza sólida, las herramientas indexables utilizan insertos indexables. Los materiales apropiados de las herramientas son el carburo cementado y el carburo con revestimiento de varios grados para todos los materiales, cerámicos para todos los materiales, herramientas de diamante policristalino para el aluminio, y nitrito de boro cúbico para aceros (véase la sección 23.2 para un estudio de estos materiales usados en las herramientas).

caso, entran en juego algunos factores importantes que no se refieren al corte, tales como velocidades de transferencia elevadas y cambios rápidos en las herramientas automáticas (tiempos de "viruta a viruta" de 7 segundos o menores).

Los requerimientos del maquinado de alta velocidad incluyen lo siguiente: 1) husillos de alta velocidad utilizando cojinetes diseñados para brindar una operación a elevadas rpm; 2) alta velocidad de avance, típicamente de alrededor de 50 m/min (2 000 in/min); 3) controles de movimiento CNC con características de "ver hacia delante" que le permitan al controlador ver cambios de dirección por venir y hacer ajustes a fin de evitar el bajo o sobre disparo respecto a la trayectoria deseada de la herramienta; 4) herramientas para el corte balanceado, sujetadores de herramientas y husillos para minimizar los efectos de la vibración; 5) sistemas de entrega de anticongelante que brinden presiones en orden de magnitud mayores que en el caso del maquinado convencional; y 6) sistemas de control y remoción de viruta que sean lo suficientemente eficaces para lidiar con altas velocidades de remoción de metal características del HSM. También son importantes los materiales para las herramientas de corte. Como se muestra en la tabla 22.1, diferentes materiales se utilizan en el maquinado a alta velocidad, los cuales se estudiarán en el capítulo siguiente.

Las aplicaciones de HSM parecen dividirse en tres categorías [3]. Una es en la industria aeronáutica, en compañías como Boeing, en las que componentes estructurales de gran longitud se maquinan a partir de grandes bloques de aluminio. Se requiere de la remoción de mucho metal, en su mayoría a través de fresado. Las piezas resultantes se caracterizan por paredes delgadas y relaciones superficie-a-volumen elevadas, sin embargo, pueden fabricarse de una manera más rápida y confiable que bloques que estén formados por múltiples componentes y uniones remachadas. Una segunda categoría involucra el maquinado de aluminio mediante operaciones múltiples para fabricar una gran variedad de componentes para industrias como la automotriz, de cómputo y médica. Un gran número de operaciones de corte significa muchos cambios de herramienta, así como aceleraciones y desaceleraciones del maquinado. Por lo tanto, son de gran importancia en estas aplicaciones los cambios de herramienta rápidos así como el control de la trayectoria de la herramienta. La tercera categoría de las aplicaciones de HSM es en la industria del troquel y del molde, la cual fabrica formas complejas a partir de materiales rígidos. En este caso, el maquinado a alta velocidad involucra un gran trabajo de remoción de material para crear el molde o cavidad del troquel y de operaciones de terminado a fin de alcanzar acabados finos en las superficies.

REFERENCIAS

[1] Aronson, R. B., "Spindles are the Key to HSM", ***Manufacturing Engineering***, octubre de 2004, pp. 67-80.

[2] Aronson, R. B., "Multitalented Machine Tools", ***Manufacturing Engineering,*** enero de 2005, pp. 65-75.

[3] Ashley, S., "High-speed Machining Goes Mainstream", ***Mechanical Engineering***, mayo de 1995, pp. 56-61.

[4] Boston, O. W., ***Metal Processing***, 2a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1951.

[5] DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R.A., ***Materials and Processes in Manufacturing,*** 9a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.

[6] Drozda, T. J. y Wick, C. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. I, ***Machining***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1983.

[7] Eary, D. F. y Johnson, G. E., ***Process Engineering: for Manufacturing***, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962.

[8] Hogan, B. J., "No Speed Limits", ***Manufacturing Engineering***, marzo de 1999, pp. 66-79.

[9] Israelsson, J. y Piscopo S., "Machining Molds and Dies at High Speeds", ***Manufacturing Engineering***, marzo de 2000, pp. 148-157.

[10] Kalpakjian, S. y Schmid, S. R., ***Manufacturing Engineering and Technology***, 4a. ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2003.

[11] Krar, S. F. y Ratterman, E., ***Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond***, McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1990.

[12] Lindberg, R. A., ***Processes and Materials of Manufacture***, 4a. ed., Allyn and Bacon, Inc., Boston, 1990.

[13] Marinac, D., "Smart Tool Paths for HSM", ***Manufacturing Engineering***, noviembre de 2000, pp. 44-50.

[14] Mason, F. y Freeman, N. B., "Turning Centers Come of Age". Special Report 773, ***American Machinist***, febrero de 1985, pp. 97-116.

[15] ***Metals Handbook***, 9a. ed., vol. 16, ***Machining***. ASM International, Materials Park, Ohio, 1989.

[16] ***Modern Metal Cutting***, AB Sandvik Coromant, Sandvik, Suecia, 1994.

[17] Rolt, L. T. C., ***A Short History of Machine Tools***, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass. 1965.

[18] Steeds, W., ***A History of Machine Tools-1700-1910***, Oxford University Press, Cambridge, Londres, 1969.

[19] Trent, E. M. y Wright, P. K., ***Metal Cutting***, 4a. ed. Butterworth Heinemann, Boston, 2000.

[20] Witkorski, M. y Binegeman, A., "The Case for Multiple Spindle HMCs", ***Manufacturing Engineering***, marzo de 2004, pp. 139-148.

PREGUNTAS DE REPASO

22.1. Describa las diferencias entre las piezas rotacionales y las piezas prismáticas en maquinado.

22.2. Distinga entre generación y formación, cuando se maquina la configuración geométrica de las piezas.

22.3. Dé dos ejemplos de operaciones de maquinado en las cuales se combinen la generación y el formado para crear la configuración geométrica de la pieza de trabajo.

22.4. Describa el proceso de torneado.

22.5. ¿Cuál es la diferencia entre el roscado exterior y el roscado interior?

22.6. ¿En qué difiere una operación de perforado de una operación de torneado?

22.7. ¿Qué significa la designación 12×36 in. en un torno?

22.8. Mencione las formas en que se puede sujetar una pieza de trabajo a un torno.

22.9. ¿Cuál es la diferencia entre un centro vivo y un centro muerto en el contexto de sujeción de trabajo en un torno?

22.10. ¿En qué se diferencia un torno revólver de un torno mecánico?

22.11. ¿Qué es un agujero ciego?

22.12. ¿Cuál es la característica que distingue a un taladro prensa radial?

22.13. ¿Cuál es la diferencia entre el fresado periférico y el fresado frontal?

22.14. Describa el fresado de perfiles.

22.15. ¿Qué es el fresado de cavidades?

22.16. Describa la diferencia entre el fresado ascendente y el fresado descendente.

22.17. ¿En qué difiere una máquina fresadora universal de una máquina convencional de codo y columna?

22.18. ¿Qué es un centro de maquinado?

22.19. ¿Cuál es la diferencia entre un centro de maquinado y un centro de torneado?

22.20. ¿Qué puede hacer un centro de torneado y fresado que no pueda hacer un centro convencional de torneado?

22.21. ¿En qué difieren el perfilado y el cepillado?

22.22. ¿Cuál es al diferencia entre el brochado interno y el brochado externo?

22.23. Identifique las tres formas básicas de la operación de aserrado.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta

vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

22.1. ¿Cuál de los siguientes son ejemplos de generación de la configuración de la pieza de trabajo en maquinado, comparadas con el formado de dicha configuración? (hay dos respuestas correctas): *a*) brochado, *b*) torneado de contornos, *c*) taladrado y *d*) fresado de perfiles.

22.2. En una operación de torneado, el cambio en diámetro de la pieza de trabajo es igual a ¿cuál de los siguientes?: *a*) 1 × profundidad de corte, *b*) 2 × profundidad de corte, *c*) 1 × avance o *d*) 2 × avance.

22.3. ¿En cuáles de las operaciones de maquinado siguientes se puede utilizar un torno? (tres respuestas correctas): *a*) perforado, *b*) brochado, *c*) taladrado, *d*) fresado, *e*) cepillado y *f*) torneado.

22.4. ¿En cuál de las siguientes máquinas herramientas se lleva a cabo normalmente una operación de careado?: *a*) prensa taladradora, *b*) torno, *c*) máquina fresadora, *d*) cepillo o *e*) perfiladora.

22.5. El moleteado se ejecuta en un torno, pero es una operación de formado de metal más que una operación de remoción de metal: *a*) verdadero o *b*) falso.

22.6. ¿Cuál de las siguientes herramientas de corte se puede usar en un torno revólver?: *a*) brocha, *b*) herramienta de corte, *c*) broca, *d*) herramienta de tornear de una punta o *e*) herramienta de roscado.

22.7. ¿Cuál de las siguientes máquinas de tornear permite usar material de barras largo?: *a*) máquina de mandril, *b*) torno mecánico, *c*) máquina para tornillos, *d*) torno manual o *e*) torno revólver.

22.8. ¿Para cuál de las siguientes funciones se usa el escariado? (tres respuestas correctas): *a*) localizar exactamente la posición de un agujero, *b*) ensanchar un agujero taladrado, *c*) mejorar el acabado superficial en un agujero, *d*) mejorar la tolerancia del diámetro de un agujero y *e*) proveer una rosca interna.

22.9. ¿A cuál de las siguientes operaciones es más parecido el fresado terminal?: *a*) fresado frontal, *b*) fresado periférico, *c*) fresado plano o *d*) fresado de placa.

22.10. ¿Cuál de las siguientes es la máquina fresadora básica?: *a*) tipo bancada, *b*) de codo y columna, *c*) fresa de perfiles, *d*) fresadora de corredera y *e*) máquina fresadora universal.

22.11. Una operación de cepillado se describe mejor por una de las opciones siguientes: *a*) una herramienta de una sola punta se mueve linealmente pasando una pieza de trabajo estacionaria, *b*) una herramienta con múltiples dientes se mueve linealmente pasando una pieza de trabajo estacionaria, *c*) una pieza de trabajo se alimenta linealmente pasando una herramienta rotativa de corte o *d*) una pieza de trabajo se mueve linealmente pasando una herramienta de una sola punta.

22.12. ¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor una operación de brochado?: *a*) una herramienta rotatoria se mueve pasando frente a una pieza de trabajo estacionaria, *b*) una herramienta con dientes múltiples se mueve linealmente pasando una pieza de trabajo estacionaria, *c*) una pieza de trabajo avanza frente a una herramienta rotatoria de corte o *d*) una pieza de trabajo se mueve linealmente frente a una herramienta estacionaria de una punta.

PROBLEMAS

Torneado y operaciones afines

22.1. Una pieza de trabajo cilíndrica de 200 mm de diámetro y 700 mm de largo se va a tornear en un torno mecánico. Las condiciones de corte son las siguientes: velocidad de corte de 2.30 m/s, el avance de 0.32 mm/rev y la profundidad de corte de 1.80 mm. Determine: *a*) el tiempo de corte y *b*) la velocidad de remoción del metal.

22.2. En una operación de torneado, el operador ha establecido que se debe completar un solo paso en la pieza de trabajo cilíndrica en 5.0 min. La pieza tiene 400 mm de largo y 150 mm de diámetro. Utilizando un avance de 0.30 mm/rev y una profundidad de corte de 4.0 mm, ¿qué velocidad de corte deberá utilizarse para cumplir este tiempo de maquinado?

22.3. Una operación de careado se lleva a cabo en un torno mecánico. El diámetro de la pieza cilíndrica es de 6 in y el largo es de 15 in. El husillo se configura para girar a una velocidad de corte de 180 rev/min. La profundidad de corte es de 0.110 in y el avance es de 0.008 in/rev. Suponga que la herramienta de corte se mueve a partir del diámetro exterior de la pieza de trabajo a exactamente el centro a una velocidad constante. Determine: *a*) la velocidad de la herramienta a medida que se mueve desde el diámetro exterior hacia el centro y *b*) el tiempo de corte.

22.4. Una superficie roscada se va a tornear en un torno automático. La pieza de trabajo tiene 750 mm de largo con diámetros mínimo y máximo de 100 mm y 200 mm en los extremos opuestos. Los controles automáticos en el torno permiten que la velocidad en la superficie se mantenga a un valor constante de 200 m/min, ajustando la velocidad rotacional en función del diámetro de la pieza de trabajo. El avance es igual a 0.25 mm/rev y la profundidad de corte de 3.0 mm. La forma rígida de la pieza ya se formó y esta operación será el corte final. Determine: *a*) el tiempo que se requiere para tornear la rosca y *b*) las velocidades de rotación al comienzo y al final del corte.

22.5. En el trabajo de torneado de la rosca del problema anterior, suponga que el torno automático con control de velocidad superficial no está disponible y que se debe utilizar un torno convencional. Determine la velocidad rotacional que se requerirá para realizar el trabajo en exactamente el mismo tiempo que especificó en la respuesta del inciso *a*) de dicho problema.

22.6. Una barra de trabajo con un diámetro de 4.5 in y largo de 52 in está roscada en un torno mecánico y soportado en el extremo opuesto utilizando un centro vivo. Una pieza de 46.0 in de la longitud total se va a tornear a un diámetro de 4.25

en un pase a una velocidad de 450 ft/min. La velocidad de remoción de material deberá ser de 6.75 in^3/min. Determine: *a*) la profundidad de corte requerida, *b*) el avance requerido y *c*) el tiempo de corte.

22.7. Una barra de trabajo de 4.00 in de diámetro que tiene una longitud de 25 in se va a tornear a un diámetro de 3.50 in utilizando dos pases en un torno mecánico utilizando las condiciones de corte siguientes: velocidad de corte de 300 ft/min, avance de 0.015 in/rev y profundidad de corte de 0.125 in. La barra se mantendrá en un mandril y estará soportada en el extremo opuesto en un centro vivo. Con esta configuración de sujeción de trabajo, un extremo debe tornearse al diámetro; después la barra deberá invertirse para tornear el otro extremo. Utilizando una grúa que se encuentra disponible en el torno, el tiempo que se requiere para cargar y descargar la barra es de 5.0 min y el tiempo para invertir la barra es de 3.0 min. Por cada corte en el torno, se debe agregar una holgura a la longitud del corte para aproximación y sobreviaje. La holgura total (aproximación más sobreviaje) es de 0.50 in. Determine el tiempo total del ciclo para completar esta operación de torneado.

22.8. El extremo de una pieza grande tubular se carea en una perforadora vertical. La pieza tiene un diámetro exterior de 38.0 in y un diámetro interior de 24 in. Si la operación de careado se ejecuta a una velocidad de rotación de 40.0 rev/min, el avance es de 0.015 in/rev y la profundidad de corte es de 0.180 in, determine *a*) tiempo de corte para completar la operación de careado y las velocidades de corte y de remoción de metal al principio y al final del corte.

22.9. Repita el problema 22.8, excepto porque los controles de la máquina herramienta operan a una velocidad de corte constante, ajustando continuamente la velocidad de rotación para posicionar la herramienta respecto al eje de rotación. La velocidad de rotación al principio de corte es de 40 rev/min, y a partir de este punto se incrementa continuamente para mantener una velocidad de corte constante.

Taladrado

22.10. Se ejecuta una operación de taladrado con una broca helicoidal de 12.7 mm de diámetro en una pieza de trabajo de acero. El agujero es un agujero ciego que tiene una profundidad de 60 mm y el ángulo de la punta es de 118º. La velocidad de corte es de 25 m/min y el avance es de 0.30 mm/rev. Determine: *a*) el tiempo de corte para completar la operación de taladrado y *b*) la velocidad de remoción de metal durante la operación después de que la broca del taladro haya alcanzado el diámetro correspondiente.

22.11. Un taladro de doble husillo simultáneamente perfora un agujero de ½ in y otro de ¾ de in mediante una pieza de trabajo de 1.0 in de ancho. Ambos taladros son de broca helicoidal con ángulos en la punta de 118º. La velocidad de corte para el material es de 230 ft/min. La velocidad de rotación de cada husillo puede configurarse de manera individual. La velocidad de avance de ambos agujeros debe configurarse al mismo valor, ya que los dos husillos bajan a la misma velocidad. La velocidad de avance se configura de tal manera que la velocidad total de remoción de metal no exceda 1.50 in^3/min. Determine: *a*) la velocidad máxima de avance (in/min) que puede utilizarse, *b*) los avances individuales (in/rev) que resultan en cada agujero y *c*) el tiempo requerido para perforar los agujeros.

22.12. Una prensa taladradora de CN ejecuta una serie de agujeros completos en una placa gruesa de aluminio de 1.75 in, que es un componente de un intercambiador de calor. Cada agujero tiene ¾ de in de diámetro. Hay 100 agujeros en total arreglados en una forma de matriz de 10 × 10, y la distancia entre los centros de los agujeros adyacentes (a lo largo del cuadro) es de 1.5 in. La velocidad de corte es de 300 ft/min, el avance de penetración (dirección z) es de 0.015 in/rev, la velocidad de corte es de 300 ft/min, el avance de penetración (dirección z) es de 0.015 in/rev y la velocidad de avance entre agujeros (plano *x*-*y*) es de 15.0 ft/min. Suponga que los movimientos *x*-*y* se hacen a una distancia de 0.05 in sobre la superficie de trabajo y que esta distancia debe incluirse en la velocidad de avance de penetración para cada agujero. Asimismo, la velocidad a la cual la broca se retira de cada agujero es dos veces la velocidad de avance de penetración. La broca tiene un ángulo de punta de 100º. Determine el tiempo requerido desde el principio del primer agujero hasta la terminación del último; suponga que se usará la secuencia de taladrado más eficiente para completar el trabajo.

22.13. Se usa una operación de taladrado para hacer un agujero de 9/64 in de diámetro a cierta profundidad. La ejecución de la operación toma 4.5 min de taladrado, usando un fluido refrigerante a alta presión en la punta de la broca. Las condiciones de corte incluyen una velocidad de husillo de 4 000 rev/min a un avance de 0.0017 in/rev. Para mejorar el acabado de la superficie en el agujero se ha decidido incrementar la velocidad en 20% y disminuir el avance en 25%. ¿Cuánto tiempo tomará ejecutar la operación de las nuevas condiciones de corte?

Fresado

22.14. Se ejecuta una operación de fresado periférico para acabar la superficie superior de una pieza de trabajo rectangular de 400 mm de largo por 60 mm de ancho. Se monta una fresa helicoidal de 80 mm de diámetro con cinco dientes, cuyo ancho de la pieza sobresale en ambos lados. La velocidad de corte es de 70 m/min, la carga de viruta es de 0.25 mm/diente y la profundidad de corte es de 5.0 mm. Determine: *a*) el tiempo para hacer un paso a través de la superficie y *b*) la velocidad de remoción de metal durante el corte.

22.15 Se usa una operación de fresado frontal para maquinar 5 mm de la superficie superior de una pieza rectangular de aluminio de 300 mm de largo por 125 mm de ancho. El cortador tiene

cuatro dientes (insertos de carburo cementado) y 150 mm de diámetro. La velocidad de corte es de 2.8 m/s y la carga de viruta es de 0.27 mm/diente. Determine *a*) el tiempo para hacer un paso a través de la superficie y *b*) la velocidad de remoción del material durante el corte.

22.16. Se lleva a cabo una operación de fresado de placa para acabar la superficie superior de una pieza de trabajo rectangular de acero de 12.0 in de largo por 2.5 in de ancho. El cortador helicoidal de fresado, que tiene un diámetro de 3.5 in y 10 dientes, se configura para sobresalir un ancho de la pieza en ambos lados. La velocidad de corte es de 125 ft/min, la carga de viruta es de 0.008 in/diente y la profundidad del corte es de 0.300 in. Determine: *a*) el tiempo que lleva hacer un pase por la superficie y *b*) la velocidad máxima de remoción de metal durante el corte.

22.17. Se ejecuta una operación de fresado frontal para acabar la superficie superior de una pieza rectangular de acero de 12.0 in de largo por 2.0 in de ancho. La fresa tiene cuatro dientes (insertos de carburo cementado) y 3.0 in de diámetro. Las condiciones de corte son: velocidad de corte de 500 ft/min, avance de 0.010 in/diente y profundidad de corte de 0.150 in. Determine: *a*) el tiempo necesario para hacer un pase por la superficie y *b*) la velocidad máxima de remoción del metal durante el corte.

22.18. Resuelva el problema anterior considerando que la pieza de trabajo tiene un ancho de 5.0 in y la fresa está desigual en un lado, por lo que el corte hecho por la fresa es de 1.0 de ancho.

22.19. Una operación de fresado frontal se utiliza para quitar 0.32 in del extremo de un cilindro que tiene un diámetro de 3.90 in. La fresa tiene un diámetro de 4 in y tiene cuatro dientes. La velocidad de corte es de 375 ft/min y la carga de viruta es de 0.006 in/diente. Determine: *a*) el tiempo de maquinado, *b*) la velocidad promedio de remoción de metal (considerando el tiempo total de maquinado) y *c*) la velocidad máxima de remoción de metal.

Otras operaciones

22.20. Se utiliza un formador para reducir el grosor de una pieza de 50 mm a 45 mm. La pieza está hecha de hierro forjado y tiene una resistencia a la tensión de 270 MPa y una dureza Brinell de 165 HB. Las dimensiones de la pieza al inicio son de 750 mm $\times$ 450 mm $\times$ 50 mm. La velocidad de corte es de 0.125 m/s y el avance es de 0.40 mm/pase. La corredera de formado opera hidráulicamente y tiene un tiempo de retorno de carrera de 50% el tiempo de corte. Se debe agregar 150 mm extra antes y después de la pieza para que se pueda llevar a cabo la aceleración y desaceleración. Suponiendo que la corredera se mueve paralelamente a la dimensión larga de la pieza, ¿cuánto tiempo le tomará a la máquina?

22.21. Un cepillo de lado abierto se va a utilizar para aplanar la superficie de una pieza de trabajo rectangular de 20.0 in $\times$ 45.0 in. La velocidad de corte es de 30 ft/min, el avance es de 0.015 in/pase y la profundidad de corte es de 0.250 in. La longitud de la carrera a través del trabajo debe configurarse de tal forma que se permitan 10 in al inicio y al final de la carrera para efectos de aproximación y sobreviaje. La carrera de retorno, incluida la holgura para aceleración y desaceleración, le toma a la carrera hacia delante 60% del tiempo. La pieza de trabajo está hecha de acero con una resistencia a la tensión de 50 000 lb/in^2 y una dureza de Brinell de 110 HB. ¿Cuánto tiempo le tomará hacer su trabajo, suponiendo que la pieza está orientada de tal manera que el tiempo sea mínimo?

22.22. El maquinado de alta velocidad (HSM) se considera para producir la pieza de aluminio del problema 22.15. Todas las condiciones de corte permanecen iguales excepto la velocidad de corte y el tipo de inserto utilizado en la fresa. Suponga que la velocidad de corte estará en el límite que especifica la tabla 22.1. Determine: *a*) el nuevo tiempo para maquinar la pieza y *b*) la nueva velocidad de remoción del metal. *c*) ¿es esta pieza buena candidata para el maquinado a alta velocidad? Explique.

23 TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Las operaciones de maquinado se realizan usando herramientas de corte. Las altas fuerzas y temperaturas durante el maquinado crean un ambiente muy agresivo para la herramienta. Las fuerzas de corte demasiado grandes fracturan la herramienta. Si la temperatura de corte se eleva demasiado, el material de la herramienta se ablanda y falla. Y si ninguna de estas condiciones ocasiona falla de la herramienta, de cualquier manera hay una acción continua de desgaste de la herramienta de corte que la conduce finalmente a la falla.

La tecnología de las herramientas de corte tiene dos aspectos principales: ***el material de la herramienta*** y la ***configuración geométrica de la herramienta***. La primera se refiere al uso de materiales que puedan soportar las fuerzas, las temperaturas y la acción de desgaste en el proceso de maquinado. La segunda se ocupa de optimizar la configuración geométrica de la herramienta de corte para el material de la herramienta y para una operación dada. Éstos son los aspectos que se tratarán en este capítulo. Es conveniente empezar considerando la vida de las herramientas, ya que ésta es un prerrequisito en la revisión de varios temas sobre los materiales para herramientas. También se incluye una sección sobre los fluidos para corte al final de este capítulo, ya que éstos se usan frecuentemente en las operaciones de maquinado para prolongar la vida de las herramientas.

23.1 VIDA DE LAS HERRAMIENTAS

Hay tres formas posibles de falla en una herramienta de corte en maquinado:

1. ***Falla por fractura.*** Este modo ocurre cuando la fuerza de corte se hace excesiva en la punta de la herramienta, causando una falla repentina por fractura.

2. ***Falla por temperatura.*** Esta falla ocurre cuando la temperatura de corte es demasiado alta para el material de la herramienta, causando ablandamiento en la punta, deformación plástica y pérdida de filo en el borde.

3. ***Desgaste gradual.*** El desgaste gradual del borde cortante ocasiona pérdida de la forma de la herramienta, reducción en la eficiencia del corte, desgaste acelerado conforme la herramienta se deteriora demasiado y por último falla final de la herramienta en una manera similar a la falla por temperatura.

Las fallas por fractura y temperatura dan como resultado una pérdida prematura de la herramienta de corte. Estas dos formas de falla son por tanto indeseables. De las tres posibles formas de falla es preferible el desgaste gradual, debido a que éste permite una mayor utilización de la herramienta con la ventaja económica asociada a un uso más prolongado.

La calidad del producto también debe considerarse cuando se intenta controlar las formas de falla de la herramienta. La falla repentina de la punta de la herramienta durante un corte causa frecuentemente daños a la superficie del trabajo. Este daño requiere volver a trabajar la superficie o posiblemente desechar la pieza. El daño se puede evitar si la selección de las condiciones de corte favorece el desgaste gradual de la herramienta y evita la fractura o la falla por temperatura, o si la herramienta se cambia antes de que ocurra una falla catastrófica del borde o filo cortante.

23.1.1 Desgaste de la herramienta

El desgaste gradual ocurre en dos lugares principales de la herramienta de corte: en la parte superior de la superficie de inclinación y en el flanco o superficie de incidencia. Por tanto, se puede distinguir dos tipos de desgaste principales de la herramienta: desgaste en cráter y desgaste del flanco, los cuales se ilustran en las figuras 23.1 y 23.2. Se utilizará una herramienta de una punta para explicar el desgaste y el mecanismo que lo causa. El

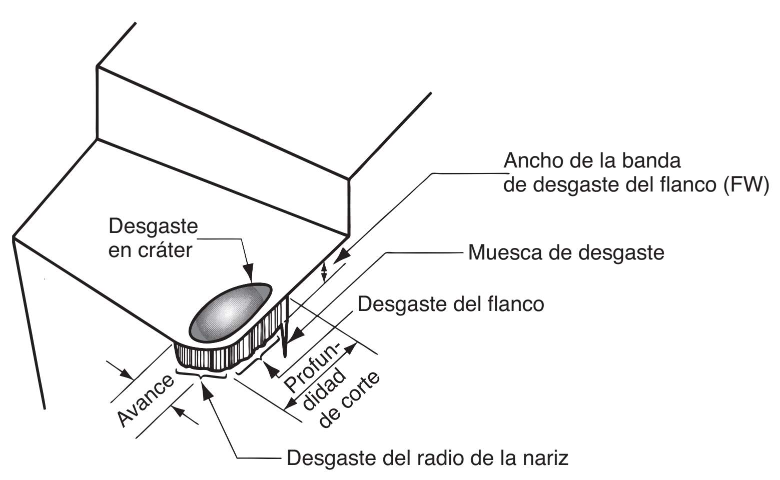
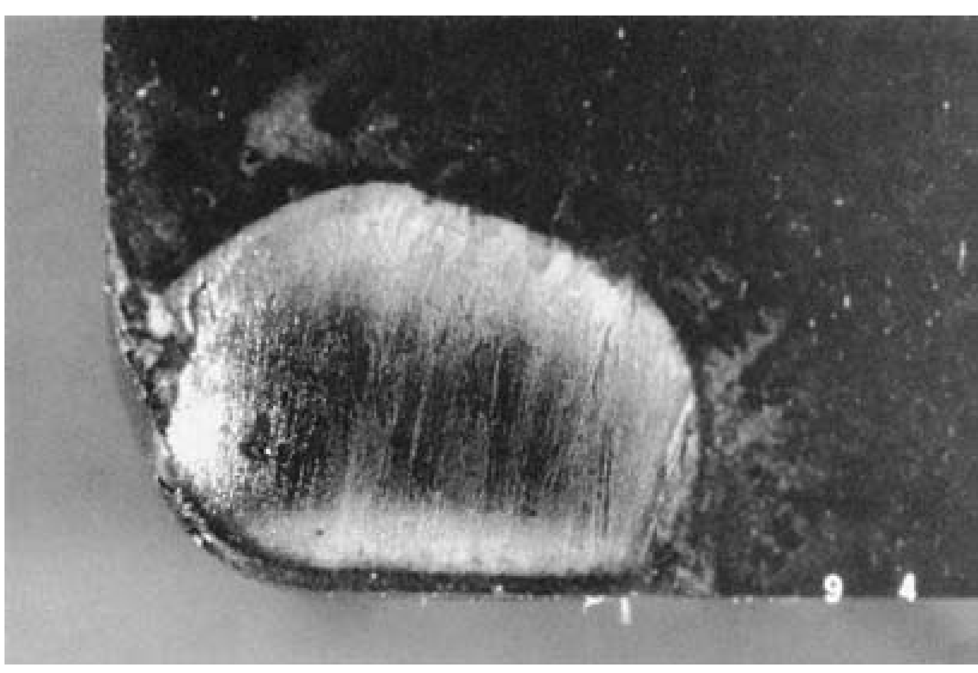


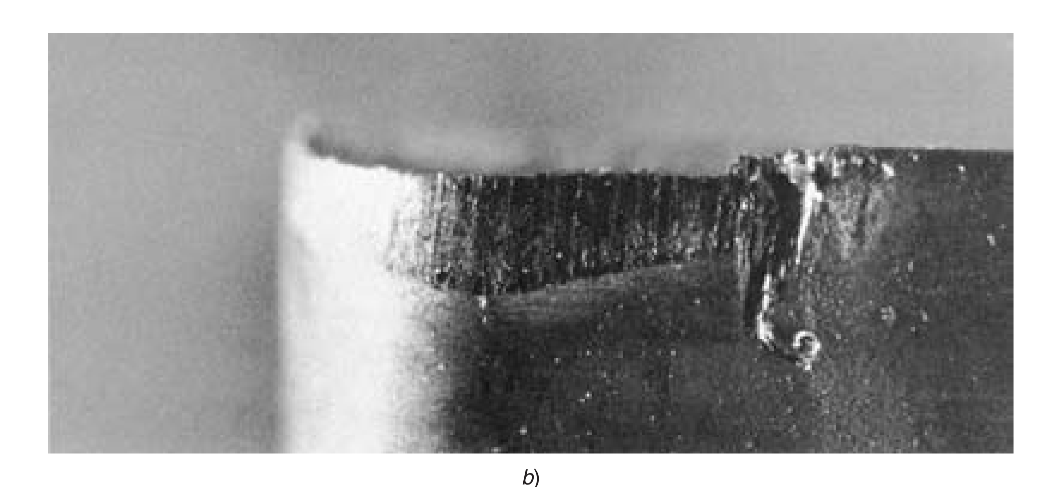
FIGURA 23.1 Diagrama de una herramienta desgastada que muestra los lugares principales y los tipos de desgaste que ocurren.



FIGURA 23.2 *a*) Desgaste en cráter y *b*) desgaste del flanco o superficie de incidencia en una herramienta de carburo cementado, como se ve a través de un microscopio de herramentista (cortesía del Laboratorio de Tecnología de Manufactura, Lehigh University, fotografía de J.C. Keefe).



a)



b)

desgaste en cráter, figura 23.2*a*), es una sección cóncava de la superficie de inclinación de la herramienta, formada por la acción de la viruta que se desliza contra la superficie. Los altos esfuerzos y temperaturas caracterizan a la interfaz de contacto herramienta-viruta y contribuyen a la acción de desgaste. El cráter puede medirse ya sea por su profundidad o por su área. El ***desgaste del flanco***, figura 23.2*b*), ocurre en el flanco o superficie de relieve de la herramienta. Resulta del rozamiento entre la recién creada superficie de trabajo y la cara del flanco adyacente al borde de corte. El desgaste del flanco se mide por el ancho de la banda de desgaste, FW. A esta banda se le llama a menudo la ***banda de desgaste***.

Se puede identificar varias características del desgaste del flanco. En primer lugar, aparece frecuentemente un desgaste extremo en el flanco sobre el filo de corte en el sitio que corresponde a la superficie original de la pieza de trabajo. A éste se le llama ***desgaste de muesca***, y ocurre porque la superficie original del trabajo es más dura y abrasiva que el material interno, debido al endurecimiento por trabajo provocado por el estirado en frío o por maquinados previos, así como por partículas de arena en la superficie de la fundición o por otras razones. Como consecuencia de la superficie más dura, el desgaste se acelera en esta región. El ***desgaste del radio de la nariz*** es la segunda región de desgaste del flanco que puede identificarse y conduce a la terminación del borde de corte.

Los mecanismos que generan desgaste a nivel de las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo en el maquinado pueden resumirse como sigue:

- ***Abrasión.*** Ésta es una acción de desgaste mecánico debido a que las partículas duras en el material de trabajo rayan y remueven pequeñas porciones de la herramienta. Esta acción abrasiva ocurre tanto en el desgaste del flanco como en el desgaste de cráter, pero predomina en el desgaste del flanco.
- ***Adhesión.*** Cuando dos metales entran en contacto a alta presión y temperatura, ocurre la adhesión o soldado entre ellos. Estas condiciones están presentes entre la viruta y la superficie de inclinación de la herramienta. A medida que la viruta fluye a través de la herramienta, se rompen pequeñas partículas de la herramienta y se separan de la superficie, provocando el desgaste de la superficie.
- ***Difusión.*** La difusión es un intercambio de átomos a través de un límite de contacto entre dos materiales (sección 4.3). En el caso del desgaste de la herramienta, la difusión ocurre en el límite herramienta-viruta y ocasiona que la superficie de la herramienta quede agotada por los átomos que le imparten su dureza. Conforme este proceso continúa, la superficie de la herramienta se vuelve más susceptible a la abrasión y a la adhesión. Se cree que la difusión es el principal mecanismo de desgaste en cráter.
- ***Reacciones químicas.*** Las altas temperaturas y superficies limpias en la interfaz herramienta-viruta en el maquinado a altas velocidades puede dar como resultado reacciones químicas, en particular, la oxidación, en la superficie de inclinación de la herramienta. La capa oxidante, que es más suave que el material de la herramienta homóloga, es cortada, exponiendo el nuevo material a que soporte el proceso de reacción.
- ***Deformación plástica.*** Otro mecanismo que contribuye al desgaste de la herramienta es la deformación plástica del borde cortante. Las fuerzas de corte que actúan en el borde de corte a altas temperaturas hacen que éste se deforme plásticamente, haciéndolo más vulnerable a la abrasión de la superficie de la herramienta. La deformación plástica contribuye principalmente al desgaste del flanco.

La mayoría de estos mecanismos de desgaste se aceleran a velocidades de corte y temperatura más altas. Especialmente sensibles a la temperatura elevada son la difusión y la reacción química.

23.1.2 Vida de las herramientas y la ecuación de Taylor

A medida que el corte se realiza, los diferentes mecanismos de desgaste producen mayores niveles de desgaste en la herramienta de corte. La relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte se muestra en la figura 23.3. Aunque la relación que se ilustra es para el desgaste del flanco, existe una relación similar para el desgaste en cráter. Por lo general se pueden identificar tres regiones en la curva típica de crecimiento del desgaste. La primera es el ***periodo de rompimiento inicial*** en el cual el borde cortante afilado

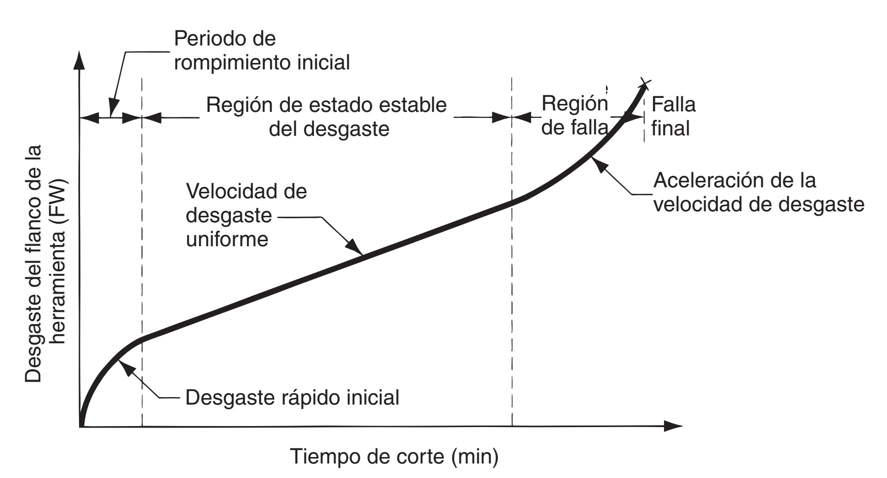


FIGURA 23.3 Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte. Se usa el desgaste de flanco (FW) como medida del desgaste de la herramienta. La curva del desgaste en cráter sigue una curva similar de crecimiento.

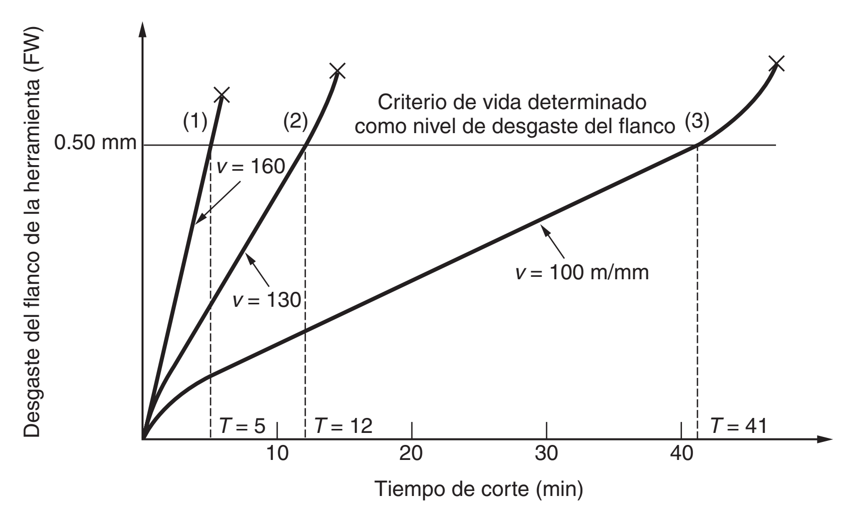


FIGURA 23.4 Efecto de la velocidad de corte sobre el desgaste de flanco (FW) o superficie de incidencia de la herramienta para tres velocidades de corte. Se dan valores hipotéticos de la velocidad de corte y de la vida de las herramientas para un criterio de vida de 0.050 in de desgaste de flanco.

se desgasta rápidamente al entrar en uso. Esta primera región se presenta en los primeros minutos de corte. A este periodo le sigue un desgaste a una velocidad más o menos uniforme y se le llama ***la región de estado estable del desgaste***. En la figura esta región se representa como una función lineal del tiempo, aunque en el maquinado real también hay desviaciones de la línea recta. Por último, el desgaste alcanza un nivel donde la velocidad del desgaste se empieza a acelerar. Esto marca el principio de la ***región de falla***, en la cual las temperaturas de corte son más altas y la eficiencia general del proceso de maquinado se reduce. Si estas condiciones continúan, la herramienta finalmente fallará por un mal control en la temperatura.

La pendiente de la curva de desgaste de la herramienta en la región de estado estable se ve afectada por el material de trabajo y las condiciones de corte. Los materiales de trabajo más duros ocasionan que se incremente la velocidad de desgaste (la pendiente de la curva del desgaste de la herramienta). Los incrementos en la velocidad, en el avance y en la profundidad de corte tienen efectos similares, pero la velocidad es el más importante de los tres. Si se trazan curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte, el resultado aparece en la figura 23.4. Al aumentar las velocidades de corte se incrementa la velocidad de desgaste, alcanzándose el mismo nivel de desgaste en menos tiempo.

La ***vida de la herramienta*** se define como la longitud de tiempo de corte en el cual se puede usar la herramienta. Una forma de definir la vida de la herramienta consiste en permitir su operación hasta que ocurra una falla catastrófica. Esto se indica en la figura 23.4 por el final de cada curva de desgaste. Sin embargo, en producción, a menudo es inconveniente usar una herramienta hasta que ocurra esta falla, debido a las dificultades que acarrea el reafilado de la herramienta y a los problemas que ocasiona a la calidad de las piezas de trabajo. Como alternativa se puede seleccionar un nivel de desgaste como criterio de la vida de la herramienta y remplazarla cuando el desgaste alcance este nivel. Un criterio conveniente de la vida de la herramienta es un cierto valor de desgaste del flanco o superficie de incidencia, como 0.5 mm (0.020 in), que en la gráfica de la figura se ilustra como una línea horizontal. Cuando cada una de las tres curvas de desgaste intersecta la línea, se determina que la vida de las herramientas correspondientes ha terminado. Si los puntos de intersección se proyectan sobre el eje del tiempo, se puede identificar los valores de la vida de la herramienta, tal como se hace en la gráfica.

Ecuación de Taylor para la vida de las herramientas Si los valores de vida de las herramientas para las tres curvas de desgaste en la figura 23.4 se trazan en una gráfica log-log de velocidad de corte contra la vida de las herramientas, la relación resultante es una línea recta, como se muestra en la figura 23.5.[1]

[1]El lector puede observar en la figura 23.5 que se ha graficado la variable dependiente (vida de la herramienta) en el eje horizontal y la variable independiente (velocidad de corte) en el eje vertical. Aunque esto está en oposición con la convención de graficado normal, es la forma como se presenta a menudo la relación de Taylor para la vida de una herramienta.

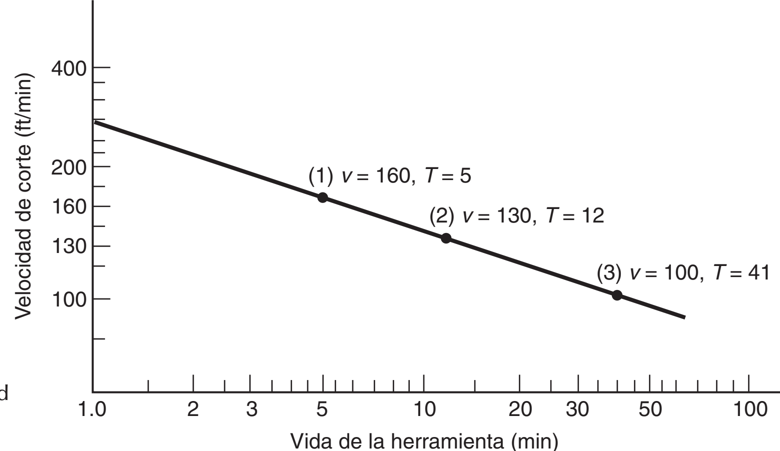


FIGURA 23.5 Gráfica en escala log-log de la velocidad de corte contra vida de la herramienta.

El descubrimiento de esta relación hacia el año 1900 se le atribuye a F. W. Taylor. Se puede expresar en forma de ecuación y se llama la ecuación de Taylor para la vida de una herramienta:

$$vt^n = C \qquad (23.1)$$

donde v = velocidad de corte, m/min (ft/min), T = vida de la herramienta, min; y n y C son parámetros cuyos valores dependen del avance, de la profundidad de corte, del material de corte, de la herramienta (material en particular) y del criterio usado para la vida de la herramienta. El valor de n es una constante relativa para un material de herramienta determinado, mientras que C depende más del material de la herramienta, material de trabajo y de las condiciones de corte. En la sección 23.2 se tratarán estas relaciones respecto a diversos materiales de herramienta.

La ecuación 23.1 establece básicamente que las velocidades de corte más altas traen como consecuencia vidas más cortas para la herramienta. Al relacionar los parámetros n y C con la figura 23.5, n es la pendiente de la gráfica (expresada en términos lineales más que en la escala de los ejes) y C es la intersección sobre el eje de velocidad. C representa la velocidad de corte a la cual la herramienta duraría un minuto.

El problema con la ecuación 23.1 es que las unidades en el lado derecho de la ecuación no son consistentes con las unidades del lado izquierdo. Para hacer consistentes las unidades de la ecuación se debe expresar en la forma:

$$vT^n = C(T_{ref}^{\ n}) \qquad (23.2)$$

donde T_{ref} = un valor de referencia para C. El valor de T_{ref} es igual a un minuto cuando las unidades que se usan para v y T son m/min (ft/min) y minutos, respectivamente. La ventaja de la ecuación 23.2 se comprende cuando se desea usar la ecuación de Taylor con otras unidades; por ejemplo, si la velocidad de corte se expresara como m/s y la vida de la herramienta como segundos, en este caso T_{ref} podría ser = 60 s y C podría tener el mismo valor de velocidad que en la ecuación 23.1, aunque convertida a unidades de m/s. La pendiente n podría tener el mismo valor numérico que en la ecuación 23.1.

EJEMPLO 23.1 Ecuación de Taylor para la vida de la herramienta

Para determinar los valores de C y n en la gráfica de la figura 23.5, se seleccionan dos de los tres puntos sobre la curva y se resuelven las ecuaciones simultáneas mediante la forma de la ecuación 23.1.

Solución: Seleccionando los dos puntos extremos: v = 160 m/min, T = 5 min y v = 100 m/min, T = 41 min; se tiene que

$$160(5)^n = C$$
$$160(41)^n = C$$

Si se igualan los lados izquierdos de cada ecuación,

$$160(5)^n = 100\ (41)^n$$

Si se toman los logaritmos naturales de cada término,

$$\ln(160) + n = \ln(100) + n \ln(41)$$
$$5.0752 + 1.6094\, n = 4.6052 + 3.7136\, n$$
$$0.4700 = 2.1042\, n$$
$$n = \frac{0.4700}{2.1042} = 0.223$$

Y se sustituye este valor de n en cualquier ecuación inicial, se obtiene el valor de C:

$$C = 160(5)^{0.223} = 229$$

o

$$C = 100(41)^{0.223} = 229$$

Por lo tanto, la ecuación de Taylor para la vida de las herramientas en los datos de la figura 23.5 es,

$$vT^{0.223} = 229$$

Se puede formular una versión aumentada de la ecuación 23.2 que incluya el efecto del avance, de la profundidad de corte y la dureza del material de trabajo:

$$vT^n f^m d^p H^q = KT_{\text{ref}}{}^n f_{\text{ref}}{}^m d_{\text{ref}}{}^p\ H_{\text{ref}}{}^q \qquad (23.3)$$

donde f = avance, mm (in); d = profundidad de corte, mm (in); H = dureza, expresada en una escala apropiada de dureza; m, p y q son exponentes cuyos valores se determinan experimentalmente para las condiciones de la operación; K = una constante análoga a C en la ecuación 23.2; y f_{ref}, d_{ref} y H_{ref} son los valores de referencia para el avance, la profundidad de corte y la dureza. Los valores de m y p, los exponentes para la alimentación o avance y la profundidad son menores que 1.0. Esto demuestra los efectos más grandes de la velocidad de corte sobre la vida de la herramienta, ya que el exponente de v es 1.0. Después de la velocidad sigue en importancia el avance, y así m tiene un valor más grande que p. El exponente para endurecimiento por trabajo, q, también es menor que 1.0.

Existen dificultades para aplicar la ecuación 23.3 a una operación práctica de maquinado. Quizá la dificultad más grande sea la tremenda cantidad de datos de maquinado que se requieren para determinar los parámetros de la ecuación. Las variaciones en el material de trabajo y las condiciones de prueba causan también dificultades por la introducción de la variación estadística en los datos. La ecuación es válida para indicar la tendencia general de las variables, pero no es capaz de predecir con precisión la vida de la herramienta en el desempeño. Para reducir estos problemas generalmente se eliminan algunos de los términos, lo cual hace que esta ecuación sea más manejable. Por ejemplo, si se elimina la profundidad y la dureza, la ecuación 23.3 se reduce a la siguiente:

$$vT^n f^m = KT_{\text{ref}}{}^n f_{\text{ref}}{}^m \qquad (23.4)$$

donde los términos tienen el mismo significado que antes, excepto porque la constante K tendrá una interpretación ligeramente diferente.

Criterios para la vida de la herramienta en producción Aunque el desgaste en el flanco es el criterio de la vida de la herramienta en el análisis de la ecuación de Taylor, este criterio no es práctico en una fábrica a causa de las dificultades y el tiempo requerido para medir el desgaste del flanco. A continuación se presentan nueve criterios para determinar la vida útil de la herramienta durante las operaciones de maquinado, pero algunos de ellos tienen carácter subjetivo:

1. La falla completa del borde cortante (por fractura, por temperatura o por desgaste).
2. La inspección visual por el operador de la máquina del desgaste del flanco (o desgaste en cráter) sin microscopio. Este criterio se limita al juicio y habilidad del operador para observar el desgaste de la herramienta a simple vista.
3. La prueba al tacto del borde o filo cortante (con la uña) por el operador.
4. Los cambios en el sonido emitido por la operación, a juicio del operador.
5. La viruta se vuelve más larga, enmarañada y más difícil de eliminar.
6. Degradación del acabado superficial en el trabajo.
7. Mayor consumo de potencia medida por un wattímetro conectado a la máquina herramienta.
8. Conteo de las piezas de trabajo. Se capacita al operador para que cambie la herramienta después de un número específico de piezas maquinadas.
9. Tiempo acumulado de corte, el cual es similar a la cuenta de piezas del punto anterior, excepto que se monitorea la longitud de tiempo que ha trabajado la herramienta. Esto es posible en las máquinas herramienta controladas por computadora, la cual se programa para registrar el tiempo total de corte de cada herramienta.

23.2 MATERIALES PARA HERRAMIENTAS

Se puede usar los tres modos de falla de la herramienta para identificar algunas de las propiedades importantes que deben poseer los materiales para herramientas:

- ***Tenacidad.*** Para evitar las fallas por fractura, el material de la herramienta debe tener alta tenacidad. La tenacidad es la capacidad de absorber energía sin que falle el material. Se caracteriza generalmente por una combinación de resistencia y ductilidad del material.
- ***Dureza en caliente.*** La dureza en caliente es la capacidad del material para retener su dureza a altas temperaturas. Ésta es necesaria debido al ambiente de altas temperaturas en que opera la herramienta.
- ***Resistencia al desgaste.*** La dureza es la propiedad más importante que se necesita para resistir el desgaste abrasivo. Todos los materiales para herramientas de corte deben ser duros. Sin embargo, la resistencia al desgaste en el corte de metales no solamente depende de la dureza de la herramienta, sino también de otros mecanismos de desgaste. El acabado superficial de la herramienta (superficie más lisa significa coeficiente de fricción más bajo), la composición química de la herramienta y de los materiales de trabajo, y el uso de un fluido para corte son otras características que afectan la resistencia al desgaste.

Los materiales de las herramientas de corte logran esta combinación de propiedades en varios grados. En esta sección se analizarán los siguientes materiales de herramientas de corte: 1) aceros de alta velocidad y sus predecesores, aceros simples al carbono y de baja aleación, 2) fundición de aleaciones de cobalto, 3) carburos cementados, cermets y carburos recubiertos, 4) cerámicas, 5) diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico. Antes de examinar estos materiales en forma individual, será útil un breve panorama y las técnicas de comparación. El desarrollo histórico de la mayoría de estos materiales se describe en la nota histórica 23.1. Desde el punto de vista comercial, los materiales para herramientas más importantes son los aceros de alta velocidad y los carburos cementados, cermets y carburos recubiertos. Estas dos categorías constituyen más de 90% de las herramientas de corte que se utilizan en las operaciones de maquinado.

La tabla 23.1 y la figura 23.6 presentan datos sobre las propiedades de varios materiales de herramientas. Las propiedades relacionadas con los requerimientos de una herramienta de corte son: dureza, tenacidad y dureza en caliente. La tabla 23.1 proporciona

Nota histórica 23.1 *Materiales para herramientas de corte.*

En 1800, Inglaterra encabezaba la Revolución Industrial y el hierro era el material más importante de esta revolución. Las mejores herramientas para cortar el hierro se hacían de fundición de acero por el proceso de crisol, inventado por B. Huntsman en 1742. La fundición de acero, cuyo contenido de carbono se sitúa entre el hierro forjado y el hierro colado, pudo ser endurecida por tratamiento térmico para maquinar los otros metales. En 1868, R. Mushet descubrió que con una aleación de tungsteno, cercana a 7%, en un crisol de acero y con un rápido enfriamiento del material al aire después del tratamiento térmico, se obtenía un acero para herramienta endurecido. El acero para herramienta de Mushet era bastante superior a sus predecesores en el maquinado.

F. W. Taylor figura como personaje importante en la historia de las herramientas de corte. Alrededor de 1880, en Midvale Steele, en Filadelfia, y después en Bethlehem Steel en Bethlehem, Pensilvania, inició una serie de experimentos que duraron un cuarto de siglo y arrojaron conocimientos más amplios cerca de los procedimientos de corte de metales. Entre los desarrollos que resultaron de los trabajos de Taylor están los aceros de alta velocidad (HSS), una clase de aceros de herramienta de alta aleación que permitieron velocidades de corte sustancialmente más altas que las de las herramientas de corte anteriores. Los adelantos de Taylor tuvieron como resultado no solamente mejores aleaciones, sino refinamientos en los tratamientos térmicos. Las herramientas de los nuevos aceros permitieron duplicar las velocidades de corte del acero de Mushet y fueron casi cuatro veces mayores que las de los aceros fundidos simples al carbono.

El carburo de tungsteno (WC) se sintetizó por primera vez alrededor de 1890. Pasaron casi tres décadas para que se creara un material que fuera útil como herramienta de corte, sinterizando el WC con un aglutinante metálico para formar los carburos cementados. Éstos se usaron por primera vez en el corte de metales a mediados de la década de 1920 en Alemania y a finales de la misma década en Estados Unidos (véase nota histórica 7.2). Las herramientas de corte de cermets basados en carburo de titanio se introdujeron por primera vez en la década de 1950, pero su importancia comercial data de los años setenta. Los primeros carburos recubiertos que consistían en un sustrato de WC-Co se usaron por primera vez alrededor de 1970. Los materiales recubiertos incluyen TiC, TiN y Al2O3. Los modernos carburos recubiertos tienen tres o más recubrimientos de éstos y otros materiales duros.

Los intentos de usar cerámicos de alúmina en el maquinado datan de principios del siglo xx en Europa. Su fragilidad impidió el éxito de estas primeras aplicaciones. Los refinamientos en su procesamiento a través de muchas décadas han tenido buenos resultados en el mejoramiento apropiado de estos materiales. El uso comercial de herramientas cerámicas de corte en Estados Unidos se remonta a mediados de la década de 1950.

Los primeros diamantes industriales los produjo la General Electric Company en 1954. Eran cristales sencillos de diamante y se aplicaron con cierto éxito en operaciones de esmerilado iniciadas hacia 1957. Se ha registrado una mayor aceptación de las herramientas de corte de diamante con el uso del diamante policristalino sinterizado (SPD por sus siglas en inglés), que data de los primeros años de la década de 1970. Un material similar para herramientas, el nitruro de boro cúbico, lo introdujo en 1969 la GE bajo la marca comercial Borazon.

TABLA 23.1 Valores típicos de dureza a temperatura ambiente y resistencia a la ruptura transversal para varios materiales de herramienta.[a]

		Resistencia a la ruptura transversal	
Material	Dureza	MPa	lb/in²
Acero simple al carbono	60 HRC	5 200	750 000
Acero de alta velocidad	65 HRC	4 100	600 000
Aleación de fundición de cobalto	65 HRC	2 250	325 000
Carburo cementado (WC)			
Bajo contenido de Co	93 HRA, 1 800 HK	1 400	200 000
Alto contenido de Co	90 HRA, 1 700 HK	2 400	350 000
Cermet	2 400 HK	1 700	250 000
Alúmina	2 100 HK	400	60 000
Nitruro cúbico de boro	5 000 HK	700	100 000
Diamante policristalino	6 000 HK	1 000	150 000
Diamante natural	8 000 HK	1 500	215 000

Recopilada de [2], [7], [18] y otras fuentes.

[a] *Nota*: Se intenta que los valores de la dureza y de TRS sean comparativos y típicos. Las variaciones en las propiedades resultan de diferencias en composición y procesamiento.

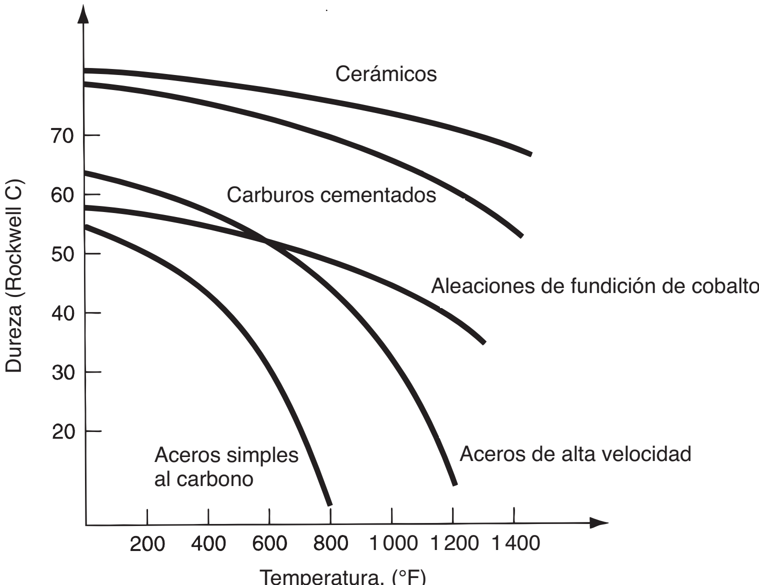


FIGURA 23.6 Relaciones típicas de dureza en caliente para materiales de herramienta seleccionados. Los aceros simples al carbono muestran una rápida pérdida de dureza conforme aumenta la temperatura. Los aceros de alta velocidad son sustancialmente mejores, mientras que los carburos cementados y los cerámicos son significativamente más duros a temperaturas elevadas.

una lista de durezas a temperatura ambiente y de resistencia a la ruptura transversal de algunos materiales seleccionados. La resistencia a la ruptura transversal (sección 3.1.3) es una propiedad que se usa para indicar la tenacidad de los materiales duros. La figura 23.6 muestra la dureza como una función de la temperatura para varios materiales de herramientas analizados en esta sección.

Además de comparar las propiedades de los materiales, es útil compararlos en términos de los parámetros n y C en la ecuación de Taylor para la vida de las herramientas. La invención de nuevos materiales para herramientas de corte ha incrementado en general los valores de estos dos parámetros. La tabla 23.2 proporciona una lista de valores representativos de n y C en la ecuación de Taylor para algunos materiales seleccionados de herramientas de corte.

El desarrollo cronológico de los materiales de herramienta ha seguido, en general, una trayectoria en la cual los nuevos materiales han permitido velocidades de corte cada vez más altas. La tabla 23.3 presenta una lista de materiales de herramientas de corte, junto con

TABLA 23.2 Valores representativos de n y C en la ecuación de la vida de las herramientas de Taylor, ecuación (23.1), para materiales seleccionados de herramienta.

		C			
		Corte sin acero		Corte con acero	
Material de herramienta	*n*	m/min	ft/min	m/min	ft/min
Acero para herramienta simple al carbono	0.1	70	(200)	20	60
Acero de alta velocidad	0.125	120	(350)	70	200
Carburo cementado	0.25	900	(2 700)	500	1 500
Cermet	0.25			600	2 000
Carburo recubierto	0.25			700	2 200
Cerámico	0.6			3 000	10 000

Recopilada de [2], [7] y otras fuentes.

Los valores de los parámetros son aproximados para torneado con avance = 0.25 mm/rev (0.010 in/rev) y profundidad = 2.5 mm (0.100 in). El corte sin acero se refiere a metales fáciles de maquinar, como aluminio, latón y hierro colado. El corte de acero se refiere al maquinado de acero suave (no endurecido). En la práctica se pueden encontrar variaciones significativas de estos valores.

TABLA 23.3 Materiales de herramientas de corte con sus datos aproximados de uso inicial y velocidades de corte permisibles.

		Velocidad permisible de corte[a]			
		Corte sin acero		Corte con acero	
Material de herramienta	Año de uso inicial	m/min	ft/min	m/min	ft/min
Acero para herramienta simple al carbono	1800	Debajo de 10	Debajo de 30	Debajo de 5	Debajo de 15
Acero de alta velocidad	1900	25-65	75-200	17-33	50-100
Aleaciones de fundición de cobalto	1915	50-200	150-600	33-100	100-300
Carburos cementados	1930	330-650	1 000-2 000	100-300	300-900
Cermets	1950			165-400	500-1 200
Cerámicos	1955			330-650	1 000-2 000
Diamantes sintéticos	1954, 1973	390-1 300	1 200-4 000		
Nitruro de boro cúbico	1969			500-800	1 500-2 500
Carburos recubiertos	1970			165-400	500-1 200

[a]Recopilada de [7], [11], [17], [20] y otras fuentes.

sus años aproximados de introducción y la velocidad de corte máxima disponible. Se han registrado drásticos incrementos en la productividad del maquinado debido a los avances en la tecnología de materiales, como se indica en la tabla. En la práctica, las máquinas herramienta no siempre han ido al paso de la tecnología de las herramientas de corte. Las limitaciones en la potencia, en la rigidez de las máquinas herramienta, en los cojinetes de los husillos y el uso extendido de equipos viejos en la industria son factores que han influido en el desaprovechamiento de las posibilidades de las altas velocidades disponibles en las herramientas de corte.

23.2.1 Aceros de alta velocidad y sus predecesores

Antes de la invención del acero de alta velocidad, los únicos materiales para corte de metales eran el acero simple al carbono y el acero de Mushet. En la actualidad estos aceros se usan esporádicamente en las aplicaciones industriales del maquinado de metales. Los aceros simples al carbono que se usaban como herramientas de corte podían tratarse térmicamente para adquirir una dureza relativamente alta (Rockwell C 60), debido a su relativamente alto contenido de carbono. Sin embargo, a causa de los bajos niveles de aleación, tienen una dureza en caliente muy deficiente (figura 23.6), lo cual los hace inútiles en el corte de metales, excepto a velocidades demasiado bajas según los estándares actuales. El acero de Mushet ha sido desplazado por los avances en la metalurgia del acero.

Los aceros de alta velocidad (HSS, por sus siglas en inglés) son aceros de herramienta altamente aleados, capaces de mantener su dureza a elevadas temperaturas mejor que los aceros de baja aleación y alto contenido de carbono. Su buena dureza en caliente permite el uso de estas herramientas a velocidades de corte más altas. Al compararlos con los materiales para herramienta usados antes de su creación, se merecieron el nombre de "alta velocidad". Se dispone de una amplia variedad de aceros de alta velocidad, pero se pueden dividir en dos tipos básicos: 1) tipo tungsteno, designados como grado-T por el American Iron and Steel Institute (AISI); y 2) tipo molibdeno, designados como grados M por el AISI.

Los ***HSS tipo tungsteno*** contienen tungsteno (W) como su principal ingrediente de aleación. Los elementos adicionales de aleación son el cromo (Cr) y el vanadio (V). Uno de los HSS originales y mejor conocidos es el grado T1 o acero de alta velocidad 18-4-1, el cual contiene 18% de W, 4% de Cr y 1% de V. ***Los grados HSS molibdeno*** contienen combinaciones de tungsteno y molibdeno (Mo), más los mismos elementos de aleación adicionales que los grados T. El cobalto (Co) se agrega a veces al HSS con el fin de mejorar su dureza en caliente. Desde luego, el acero de alta velocidad contiene carbono, el elemento

TABLA 23.4 Contenido típico y funciones de los elementos de aleación en acero de alta velocidad.

Elemento de aleación	Contenido típico en HSS, % en peso	Funciones en el acero de alta velocidad
Tungsteno	Tipo T HSS: 12-20 Tipo M HSS: 1.5-6	Incrementa la dureza en caliente Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS.
Molibdeno	Tipo T HSS: ningún tipo M HSS: 5-10	Incrementa la dureza en caliente Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS.
Cromo	3.75-4.5	Profundiza la templabilidad durante el tratamiento térmico Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS. Resistencia a la corrosión (efecto menor).
Vanadio	1-5	Se combina con el carbono para resistencia al desgaste. Retarda el crecimiento de los granos para mejor tenacidad
Cobalto	0-12	Incrementa la dureza en caliente
Carbono	0.75-1.5	Elemento principal de endurecimiento del acero Proporciona carbono disponible para formar carburos con otros elementos de aleación e incrementa la resistencia al desgaste.

común que tienen todos los aceros. El contenido y las funciones típicas de cada elemento aleado en HSS se listan en la tabla 23.4.

Desde el punto de vista comercial, el acero de alta velocidad es uno de los más importantes materiales de herramientas de corte que se usan en la actualidad, y a pesar de haberse introducido hace cerca de un siglo, es especialmente apropiado para aplicaciones que involucran herramientas de formas complicadas, como taladros, tarrajas, fresas y escariadores. Estas complejas herramientas son por lo general más fáciles y menos costosas de producir con HSS que con otros materiales de herramienta. Se pueden tratar térmicamente para que el filo de corte adquiera muy buena dureza (Rockwell C 65), a la vez que mantienen buena tenacidad en las porciones internas de la herramienta. Los buriles de acero de alta velocidad tienen mejor tenacidad que cualquiera de los materiales que poseen mayor dureza y no están fabricados con acero grado herramienta, pero se emplean para maquinado, como carburos cementados y cerámicos. Aun para herramientas de una punta, los aceros de alta velocidad son muy populares entre los maquinadores debido a la facilidad con que se puede tallar cualquier forma en la punta de la herramienta. A través de los años se han hecho algunas mejoras en la formulación metalúrgica de los HSS, por lo cual esta clase de materiales de herramienta permanece competitiva para muchas aplicaciones. Asimismo, las herramientas HSS, las brocas en particular, se recubren también frecuentemente con una delgada película de nitruro de titanio (TiN) para obtener una significativa mejoría en el desempeño de corte. El bombardeo con partículas y el chapeado iónico, ambos procesos de deposición física de vapor (sección 29.3), se usan generalmente para realizar estos recubrimientos en las herramientas de HSS.

23.2.2 Aleaciones de fundición de cobalto

Las herramientas de corte fabricadas con aleaciones de fundición de cobalto consisten de cobalto en 40 a 50%; cromo en 25 a 35%; y tungsteno, por lo general de 15 a 20%, con trazas de otros elementos. Estas herramientas se hacen a la forma deseada a través de fundición de moldes de grafito y después se esmerilan para darles el tamaño y afilado final. La resistencia al desgaste es mejor que la del acero de alta velocidad, pero no tanto como la de los carburos cementados. La tenacidad de las herramientas de fundición de cobalto es mejor que la de los carburos, pero no tan buena como la de los HSS. La dureza en caliente se sitúa también entre los dos materiales.

Como se puede esperar de sus propiedades, las aplicaciones de las herramientas de fundición de cobalto están generalmente entre las de los aceros de alta velocidad y las

de los carburos cementados. Son capaces de cortes burdos pesados a velocidades mayores que las de los HSS y avances mayores que la de los carburos. Los materiales de trabajo incluyen aceros de metales, así como materiales no metálicos como plásticos y grafito. En la actualidad, las herramientas de fundición de cobalto no son comercialmente tan importantes como los aceros de alta velocidad o los carburos cementados. Éstos se introdujeron alrededor de 1915 como un material de herramientas que podría permitir velocidades de corte más altas que los HSS; pero los carburos se desarrollaron posteriormente y probaron ser superiores a las aleaciones de fundición de cobalto en la mayoría de las situaciones de corte.

23.2.3 Carburos cementados, cermets y carburos recubiertos

Los ***cermets*** son compuestos de materiales ***cer***ámicos y ***met***álicos (sección 9.2.1). Los carburos cementados se incluyen técnicamente dentro de esta definición; sin embargo, los cermets basados en WC-Co, incluidos WC-TiC-TaC-Co, se conocen como carburos (carburos cementados) de uso común. En la terminología de las herramientas de corte, el término cermet se aplica a los compuestos cerámico-metálicos que contienen TiC, TiN y otros materiales cerámicos, excepto el WC. Un avance en los materiales de corte involucra la aplicación de recubrimientos muy delgados a un sustrato de WC-Co. Estas herramientas se llaman carburos recubiertos. De esta manera se tienen tres materiales estrechamente relacionados que se analizarán en esta sección: 1) carburos cementados, 2) cermets y 3) carburos recubiertos.

Carburos cementados Los ***carburos cementados*** (también llamados ***carburos sinterizados***) son una clase de materiales duros para herramienta formulados con carburo de tungsteno (WC), y manufacturados con técnicas de metalurgia de polvo (capítulo 16) en las que se utiliza el cobalto (Co) como aglutinante (secciones 7.3.2, 9.2.1, y 17.3.1). Además del WC, puede haber otros compuestos de carburo en la mezcla, como carburo de titanio (TiC) o carburo de tantalio (TaC).

Las primeras herramientas de corte de carburo cementado se hicieron de WC-Co (nota histórica 7.2) y se usaron para maquinar hierro colado y materiales sin acero a velocidades de corte más rápidas que las que eran posibles con los aceros de alta velocidad y las aleaciones de fundición de cobalto. Sin embargo, cuando se usaron directamente las herramientas WC-Co para maquinar acero, apareció el desgaste en cráter, que condujo a fallas prematuras en las herramientas. La fuerte afinidad química entre el acero y el WC-Co provoca un desgaste acelerado por adhesión y difusión en la interfaz herramienta-viruta para esta combinación trabajo-herramienta. En consecuencia, no se usaron efectivamente las herramientas fabricadas solamente con WC-Co para maquinar acero. Subsecuentemente se descubrió que las adiciones de carburo de titanio y carburo de tantalio a la mezcla de WC-Co retardaban de manera significativa la velocidad de desgaste en cráter al cortar acero. Estas nuevas herramientas con WC-TiC-TaC-Co se podían usar para el maquinado del acero. El resultado es que los carburos cementados se dividen en dos tipos básicos: 1) grados de corte para material que no incluyan el acero, los cuales consisten solamente en WC-Co y 2) grados de corte para acero con combinaciones de TiC y TaC añadidos al WC-Co.

Las propiedades generales de los dos tipos de carburos cementados son similares: 1) alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tensión moderada; 2) alta dureza (90 a 95 HRA); 3) buena dureza en caliente; 4) buena resistencia al desgaste; 5) alta conductividad térmica; 6) alto módulo de elasticidad, con valores de E cercanos a 600×10^3 MPa (90×10^6 lb/in^2) y 7) tenacidad más baja que los aceros de alta velocidad.

Los ***grados de corte para materiales que no incluyen el acero*** se refieren a aquellos carburos cementados que son apropiados para maquinar aluminio, latón, cobre, magnesio, titanio y otros metales no ferrosos; el hierro colado gris se incluye irregularmente en este grupo de materiales de trabajo. En los grados de corte de material no acerado, el tamaño de los granos y el contenido de cobalto son los factores que influyen en las propiedades del material de carburo cementado. El tamaño de grano típico que se encuentra en los carburos cementados convencionales varía entre 0.5 y 5 μm (20 y 200 μ-in). Al incrementarse el tamaño del grano, disminuye la dureza y la dureza en caliente, pero aumenta la resistencia

TABLA 23.5 Los sistemas de clasificación de grado C de la ANSI para los carburos cementados.

Aplicación en el maquinado	Grados de corte no acerado	Grados de corte acerado	El cobalto y sus propiedades
Desbastado	C1	C5	Alto cobalto para máxima tenacidad
Propósito general	C2	C6	De medio a alto Co
Acabado	C3	C7	De medio a bajo Co.
Acabado de precisión	C4	C8	Bajo Co para máxima dureza
Materiales de trabajo	Latón, hierro colado	Carbono y aceros aleados	
Ingredientes típicos	WC-Co	WC-TiC-TaC-Co	

a la ruptura transversal.[2] El contenido de cobalto típico en carburos cementados que se utilizan en las herramientas de corte es de 3 a 12%. El efecto del contenido de cobalto sobre la dureza y la resistencia a la ruptura transversal se muestra en la figura 9.9. A medida que el contenido de cobalto se incrementa, la TRS mejora a expensas de la dureza y la resistencia al desgaste. Los carburos cementados con bajo porcentaje de contenido de cobalto (3% a 6%) tienen una alta dureza y baja TRS, mientras que los carburos con Co alto (6% a 12%) tienen una alta TRS y, sin embargo, baja dureza (tabla 23.1). De acuerdo con lo anterior, los carburos cementados con alto contenido de cobalto se usan en operaciones de maquinado burdo y cortes interrumpidos (como el fresado), mientras que los carburos con bajo contenido de cobalto (dureza y resistencia al desgaste más altas) se usan para cortes de acabado.

Los ***grados de corte de acero*** se usan para aleaciones de acero de bajo carbono, inoxidable y otras. Para estos grados de carburo, el carburo de titanio o el carburo de tantalio se sustituyen por algo de carburo de tungsteno. El TiC es el aditivo más popular en la mayoría de las aplicaciones. Se puede remplazar típicamente de 10 a 25% de WC mediante combinaciones de TiC y TaC. Esta composición incrementa la resistencia al desgaste en cráter para el corte de acero, pero tiende a afectar adversamente la resistencia al desgaste del flanco o superficie de incidencia en aplicaciones de corte de materiales que no son acerados. Es por esto que se necesitan dos categorías básicas de carburo cementado.

Uno de los desarrollos más significativos en la tecnología de los carburos cementados en años recientes es el uso de tamaños de grano muy finos (tamaños del orden de submicras) de los diferentes ingredientes del carburo (WC, TiC y TaC). Aunque un tamaño pequeño de grano generalmente se asocia con una mayor dureza pero menor resistencia a la ruptura transversal, la disminución en la TRS se ve reducida o revertida con tamaños de partículas del orden de las submicras. Por lo tanto, estos carburos de grano extremadamente fino poseen una alta dureza combinada con una buena tenacidad.

Puesto que los dos tipos básicos de carburo cementado se introdujeron en las décadas de 1920 y 1930, la variedad y el número de materiales de ingeniería cada vez mayor ha complicado la selección de los carburos cementados más apropiados para una aplicación de maquinado particular. Para resolver el problema de la selección del grado, se han importado dos sistemas de clasificación: 1) el sistema de grados C de la ANSI,[3] implementado en Estados Unidos alrededor del año 1942; y 2) el sistema ISO R513-1975(E), presentado por la International Organization of Standarization (ISO) aproximadamente en 1964. En el sistema de grados C, resumido en la tabla 23.5, los grados de maquinado de los carburos cementados se dividen en dos grupos básicos, correspondientes a las categorías de corte acerado y sin corte acerado. Dentro de cada grupo, hay cuatro niveles correspondientes al maquinado burdo, propósito general, acabado y acabado de precisión.

El sistema ISO R513-1975(E), titulado "Aplicación de los Carburos en el Maquinado mediante Remoción de Viruta", clasifica todos los grados de maquinado de carburos cementados en tres grupos básicos, cada uno de los cuales con su propio código de letra y

[2]El efecto del tamaño del grano (GS) en la resistencia a la ruptura transversal (TRS) es más complicado que lo que se está reportando. Los datos en la literatura indican que el efecto de GS y TRS está influido por el contenido de cobalto. Con un bajo contenido de cobalto (< 10%), la TRS en realidad no aumenta a medida que GS aumenta; sin embargo, al aumentar el contenido de cobalto (> 10%) la TRS disminuye a medida que el GS se incrementa [3], [14].
[3]ANSI = American National Standards Institute.

TABLA 23.16 ISO R513-1975(E) "Aplicación de los carburos en el maquinado mediante remoción de viruta"

Grupo	Tipo de carburo	Materiales de trabajo	Número de esquema (Cobalto y sus propiedades)
P Azul	Altamente aleado TiC-TaC-Co	Acero, fundición de acero, hierro colado dúctil (metales ferrosos con virutas grandes)	(Bajo Co para dureza máxima) a P50 (Alto Co para tenacidad máxima)
M Amarillo	Aleado TaC-Co	Acero libre de corte, hierro colado gris, acero inoxidable austénico, superaleaciones.	M10 (Bajo Co para dureza máxima) a M40 (Alto Co para tenacidad máxima)
K Rojo	Directo WC-Co	Metales no férricos y aleaciones, hierro colado gris (metales ferrosos con virutas cortas), no metales.	K01 (Bajo Co para dureza máxima) a Alto Co para tenacidad máxima

color, como se muestra en la tabla 23.6. Dentro de cada grupo, los grados están numerados en una escala que va desde la dureza máxima a la tenacidad máxima. Los grados con mayor dureza se utilizan en operaciones de acabado (altas velocidades y profundidades y avances bajos), mientras que los grados con mayor tenacidad se utilizan en operaciones de maquinado burdo. El sistema de clasificación de la ISO también puede utilizarse para indicar aplicaciones para cermets y carburos recubiertos.

Los dos sistemas tienen una correspondencia entre sí de la manera siguiente: Los grados C1 a C4 de la ANSI corresponden a los grados K de la ISO, pero en orden numérico inverso, y los grados C5 a C8 de la ANSI se traducen en los grados P de la ISO, pero, de nuevo, en orden numérico inverso.

Cermets Aunque los carburos cementados se clasifican técnicamente como compuestos cermets, en la tecnología de herramientas de corte, el término ***cermet*** generalmente se reserva para las combinaciones de TiC, TiN y carbonitruro de titanio (TiCN), usando níquel y/o molibdeno como aglutinantes. Algunos de los compuestos químicos de los cermets son más complejos (por ejemplo, cerámicos como Ta_xNb_yC y aglutinantes como MO_2C). Sin embargo, los cermets excluyen compuestos metálicos que están basados principalmente en WC-Co. Las aplicaciones de los cermets incluyen acabados a altas velocidades y semiterminado de aceros, aceros inoxidables y fundiciones de hierro. Estas herramientas permiten velocidades más altas, comparadas con las que permiten generalmente los carburos de grado corte de acero. Es normal que se usen menores avances y así se obtienen mejores superficies de acabado, eliminando muchas veces la necesidad del esmerilado.

Carburos recubiertos Alrededor de 1970 se crearon los carburos recubiertos; esto representó un avance significativo en la tecnología de herramientas de corte. Los ***carburos recubiertos*** son insertos de carburo cementado recubierto con una o más capas delgadas de un material resistente al desgaste, como carburo de titanio, nitruro de titanio u óxido de aluminio (Al_2O_3). El recubrimiento se aplica al sustrato por deposición química de vapor (sección 29.4) o deposición física de vapor (sección 29.3). El espesor del recubrimiento es solamente de 2.5 – 13 μm (0.0001-0.0005 in). Se ha observado que los recubrimientos más gruesos tienden a ser más frágiles y producen agrietamientos, desportilladuras y separación del sustrato.

La primera generación de carburos recubiertos tenía sólo una capa de recubrimiento (TiC, TiN o Al_2O_3) y este tipo de herramienta se encuentra todavía en uso. Más recientemente se han creado insertos recubiertos que consisten en múltiples capas. La primera capa se aplica a la base de WC-Co y consiste por lo general en TiN o TiCN debido a su buena adhesión y a su coeficiente de expansión térmica similar. Posteriormente se aplican capas adicionales de varias combinaciones de TiN, TiCN, Al_2O_3 y TiAIN.

Los carburos recubiertos se usan para maquinar hierro y acero fundidos en operaciones de torneado y fresado. Se aplican mejor a altas velocidades de corte en situaciones donde las fuerzas dinámicas y el choque térmico son mínimos. Si estas condiciones se vuelven demasiado severas como en algunas operaciones interrumpidas de corte, pueden ocurrir desportilladuras de los recubrimientos, ocasionando una falla prematura de la herramienta. En estas situaciones son preferibles los carburos sin recubrir y formulados para una mayor tenacidad. Cuando las herramientas de carburo recubierto se aplican correctamente,

permiten incrementar las velocidades permisibles de corte respecto a los carburos cementados no recubiertos.

El uso de las herramientas de carburo recubierto se está extendiendo a metales no ferrosos y aplicaciones no metálicas para mejorar la vida de la herramienta, así como para obtener velocidades de corte más altas. Se requieren diferentes materiales de recubrimiento, como el carburo de cromo (CrC), nitruro de circonio (ZrN) y diamante [10].

23.2.4 Cerámicos

Las herramientas de corte hechas de materiales cerámicos se usaron comercialmente por primera vez en Estados Unidos a mediados de la década de 1950, aunque su desarrollo y uso en Europa se remonta a principios de 1900. En la actualidad las herramientas de corte a base de materiales cerámicos están compuestas principalmente de ***óxido de aluminio*** (Al_2O_3) de grano fino, prensado y sinterizado a altas presiones y temperaturas sin aglutinante en forma de inserto (sección 17.2). El óxido de aluminio es por lo general muy puro (99% típicamente), aunque algunos fabricantes añaden otros óxidos, como óxido de circonio en pequeñas cantidades. Es importante usar polvos de alúmina muy finos en la producción de herramientas cerámicas y maximizar la densidad de la mezcla a través de la compactación a alta presión, a fin de mejorar la baja tenacidad del material.

Las herramientas de corte de óxido de aluminio tienen más éxito en el torneado a altas velocidades de fundiciones de hierro y acero. Dichas herramientas se pueden usar para operaciones de acabado en el torno en aceros endurecidos, donde las velocidades de corte son altas, y tanto el avance como la profundidad de corte son bajos, y se emplean instalaciones rígidas de trabajo. Muchas fallas por fractura prematura de herramientas cerámicas se deben a máquinas herramientas no rígidas, que sujetan a las herramientas a fuerza dinámicas. Cuando las herramientas cerámicas de corte se aplican apropiadamente, pueden usarse para obtener buen acabado en las superficies. No se recomiendan las herramientas cerámicas para operaciones interrumpidas de corte basto (por ejemplo, fresado basto) debido a su baja tenacidad. Además de las aplicaciones de los insertos de óxido de aluminio en operaciones de maquinado convencional, el Al_2O_3 se usa ampliamente como un abrasivo en esmerilado y otros procesos abrasivos (capítulo 25).

Otras herramientas cerámicas de corte disponibles comercialmente incluyen: nitruro de silicio (SiN), ***sialon*** (que consiste en nitruro de silicio y óxido de aluminio, $SiN\text{-}Al_2O_3$), óxido de aluminio y carburo de titanio ($Al_2O_3\text{-}TiC$) y óxido de aluminio reforzado con cristales simples de carburo de silicio. Estas herramientas se diseñan generalmente para aplicaciones especiales, las cuales están fuera del alcance de este libro.

23.2.5 Diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico

El diamante es el material más duro que se conoce (sección 7.6.1). Según algunas medidas de dureza, el diamante es cerca de tres o cuatro veces más duro que el carburo de tungsteno o que el óxido de aluminio. Como la alta dureza es una de las propiedades deseables de las herramientas de corte, es natural que se piense en los diamantes para aplicaciones de esmerilado y maquinado. Las herramientas de corte de diamante sintético se hacen con diamante policristalino sinterizado (SPD por sus siglas en inglés) y se remontan a los primeros años de la década de los setenta. El ***diamante policristalino sinterizado*** se fabrica mediante la sinterización de polvos finos de cristales de diamante granulado a altas temperaturas y presiones en la forma deseada; se usa poco o ningún aglutinante. Los cristales tienen una orientación aleatoria y esto añade considerable tenacidad a las herramientas de SPD, en relación con los cristales simples de diamante. Los insertos de herramientas se hacen de manera usual depositando una capa de SPD de aproximadamente 0.5 mm (0.020 in) de grueso sobre la superficie de una base de carburo cementado. También se han hecho insertos muy pequeños de SPD a 100%

Las aplicaciones de las herramientas de corte de diamante incluyen el maquinado a alta velocidad de metales no ferrosos y abrasivos no metálicos como fibras de vidrio,

grafito y madera. No es práctico maquinar el acero y otros metales ferrosos, así como las aleaciones basadas en níquel, con herramientas de SPD, debido a la afinidad química que existe entre estos metales y el carbono (el diamante, ante todo, es carbono).

Después del diamante, el material más duro conocido es el ***nitruro de boro cúbico*** (sección 7.3.3) y su fabricación en forma de herramientas de corte es básicamente la misma que se usa para el SPD, esto es, recubrimientos sobre insertos de WC-Co. El nitruro de boro cúbico (cuyo símbolo es CBN) no reacciona químicamente con el hierro y el níquel como lo hace el SPD; por tanto, las aplicaciones de herramientas recubiertas de CBN se aplican para maquinar acero y aleaciones basadas en níquel. Como es de imaginarse, las herramientas SPD y CBN son costosas, por consiguiente, sus aplicaciones deben justificar el costo de las herramientas adicionales.

23.3 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS HERRAMIENTAS

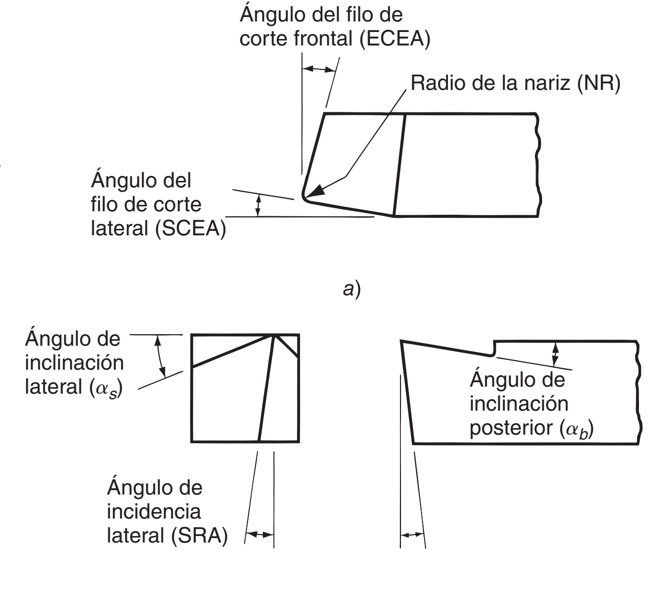
La herramienta de corte deben tener una forma apropiada para las aplicaciones de maquinado. Una forma importante de clasificar las herramientas de corte es atendiendo a los procesos de maquinado. De esta forma se tienen herramientas para torneado, herramientas para trozado, fresas, brocas, escariadores, tarrajas y muchas otras herramientas de corte, cuyo nombre deriva de la operación en que se usa cada una con su configuración geométrica propia y única.

Como se indica en la sección 21.1, las herramientas de corte se pueden dividir en dos categorías: de una punta y de bordes o múltiples filos cortantes. Las herramientas de una punta se usan en torneado, perforado, perfilado y cepillado. Las herramientas de bordes o múltiples filos cortantes se usan en taladro, rimado, roscado, fresado, escariado y aserrado. La mayoría de estas operaciones en la segunda categoría usan herramientas rotatorias. Muchos de los principios que se aplican a las herramientas de una punta se aplican también a otros tipos de herramientas de corte, simplemente porque el mecanismo de la formación de viruta es básicamente el mismo para todas las operaciones de maquinado.

23.3.1 Configuración geométrica de las herramientas de una punta

La forma general de una herramienta de punta sencilla se ilustra en la figura 23.4a. Un diagrama más detallado se muestra en la figura 23.7.

FIGURA 23.7 *a*) Siete elementos de la configuración geométrica de una herramienta de una punta y *b*) la forma convencional de la herramienta que define los siete elementos.



Ya se ha considerado el ángulo de inclinación de una herramienta de corte como un parámetro. En una herramienta de una punta, la orientación de la superficie de inclinación se define por dos ángulos, el ***ángulo de inclinación posterior*** (α_b) y el ***ángulo de inclinación lateral*** (α_s). Estos dos ángulos tienen una influencia determinante en la dirección del flujo de la viruta sobre la cara o superficie de inclinación. La superficie del flanco o incidencia de la herramienta se define por el ***ángulo de incidencia frontal*** (ERA, por sus siglas en inglés) y el ***ángulo de incidencia lateral*** (SRA, por sus siglas en inglés). Estos ángulos determinan la magnitud del claro entre la herramienta y la superficie de trabajo recién creada. El borde de corte de una herramienta de una punta se divide en dos secciones, el borde de corte lateral y el borde de corte frontal. Estas secciones están separadas por la punta de la herramienta que tiene un cierto radio, llamado radio de la nariz. El ***ángulo de filo de corte lateral*** (SCEA, por sus siglas en inglés) determina la entrada de la herramienta en el material y puede usarse para reducir la fuerza repentina que experimenta la herramienta al entrar en la pieza de trabajo. El ***radio de la nariz*** (NR por sus siglas en inglés) determina en gran parte la textura de la superficie generada en la operación. Una herramienta muy apuntada (pequeño radio de nariz) produce marcas de avance muy pronunciadas en la superficie. Se volverá a tocar este punto de las superficies rugosas en el maquinado en la sección 24.2.2. El ***ángulo de filo de corte frontal*** (ECEA, por sus siglas en inglés) proporciona un claro entre el borde de salida de la herramienta y la superficie de trabajo recientemente generada, reduciendo así el roce y la fricción contra la superficie.

Para una herramienta de una punta hay siete elementos que definen su configuración geométrica. Cuando se especifican en el siguiente orden se llaman colectivamente la ***firma de la configuración geométrica de la herramienta***: ángulo de inclinación posterior, ángulo de inclinación lateral, ángulo de incidencia frontal, ángulo de incidencia lateral, ángulo de filo de corte frontal, ángulo del filo de corte lateral y radio de la nariz. Por ejemplo, una herramienta de una punta que se usa en torneado debe tener la siguiente firma: 5, 5, 7, 7, 20, 15, 2/64 in.

Rompevirutas La eliminación de la viruta es un problema que se encuentra frecuentemente en torneado y otras operaciones continuas. Con frecuencia se generan largas tiras de viruta, especialmente cuando se tornean materiales dúctiles a altas velocidades. Estas virutas representan un peligro para el operador de la máquina y para el acabado de la pieza de trabajo, e interfieren con la operación automática del proceso de torneado. A menudo se usan ***rompevirutas*** junto con las herramientas de una punta; de esta forma se fuerza a la viruta a enrollarse más cerradamente de lo normal, causando su fractura. Hay dos diseños comunes del rompevirutas para herramientas de torneado de una punta, como se ilustra en la figura 23.8: *a*) rompevirutas de muesca, diseñado dentro de la misma herramienta de corte; y *b*) rompevirutas tipo obstrucción, diseñado como un dispositivo adicional sobre la

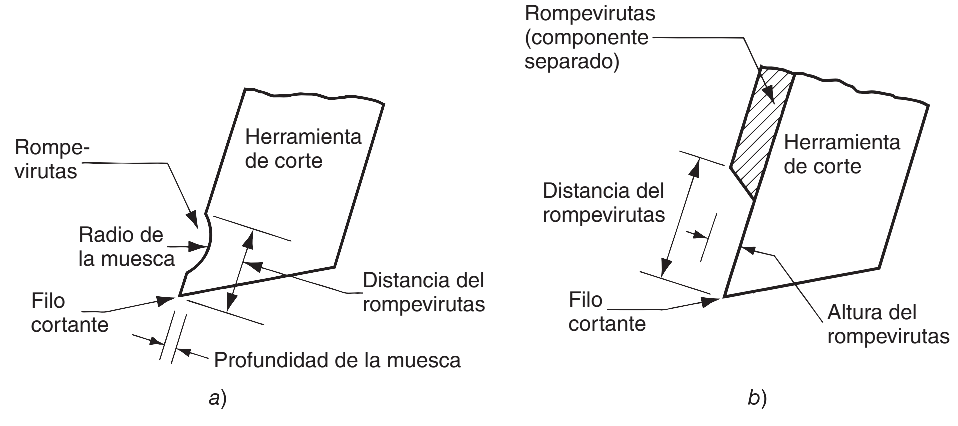


FIGURA 23.8 Dos métodos para romper la viruta en las herramientas de una punta: *a*) tipo muesca y *b*) tipo obstrucción.

superficie de inclinación de la herramienta. La distancia del rompevirutas se puede ajustar en el dispositivo tipo obstrucción para diferentes condiciones de corte.

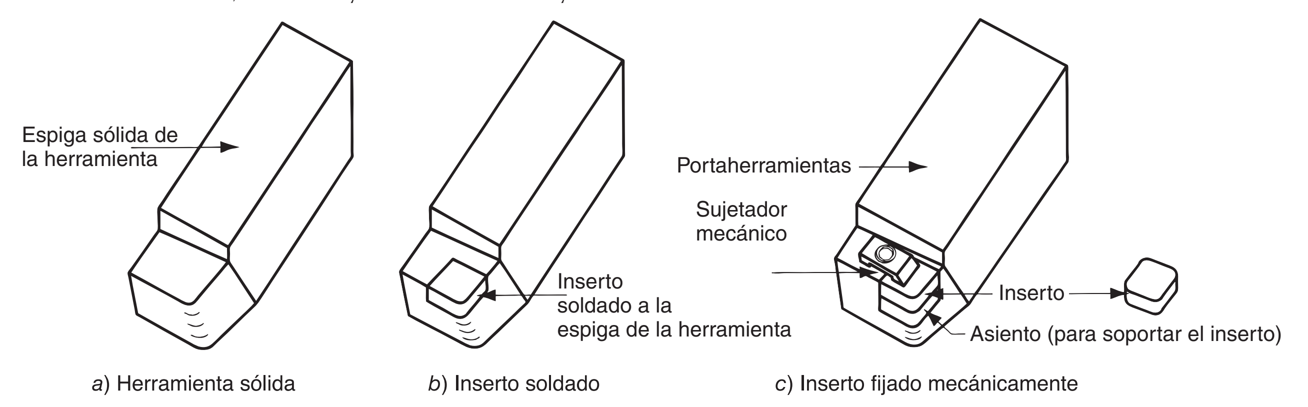
Efecto del material de la herramienta sobre la configuración geométrica de la herramienta En el estudio de la ecuación de Merchant (sección 21.3.2) se señaló que generalmente es deseable un ángulo de inclinación positivo para reducir las fuerzas de corte, la temperatura y el consumo de potencia. Las herramientas de corte de acero de alta velocidad se hacen casi siempre con ángulos positivos de inclinación, fluctuando típicamente entre +5º a +20º. Los HSS tienen buena resistencia y tenacidad, de manera que las secciones más delgadas de la herramienta creadas por altos ángulos de inclinación positivos por lo general no causan problemas de fractura en las herramientas. Las herramientas de HSS se hacen predominantemente de una sola pieza. Se puede controlar el tratamiento térmico de los aceros de alta velocidad para suministrar un filo de corte duro; esto mantiene un núcleo interior tenaz.

Con la creación de materiales muy duros para herramientas (carburos cementados y cerámicas) se requirieron cambios en la configuración geométrica de las herramientas. Estos materiales, como grupo, tienen durezas más altas y tenacidades más bajas que los aceros de alta velocidad. Sus resistencias al corte y a la tensión también son bajas respecto a su resistencia a la compresión y sus propiedades no pueden manipularse mediante tratamiento térmico como las de los HSS. Por último, el costo por peso unitario de estos materiales muy duros es más alto que el costo de los aceros de alta velocidad. Estos factores han afectado el diseño de las herramientas de corte para los materiales de herramientas duras en varias formas.

En primer lugar, los materiales muy duros se deben diseñar con ángulos de inclinación negativos o ligeramente positivos. Este cambio tiende a cargar la herramienta más a la compresión y menos al corte, favoreciendo la alta resistencia a la compresión de estos materiales más duros. Por ejemplo, los carburos cementados se usan con ángulos de inclinación típicos en la escala de −5º a +10º. Los cerámicos tienen ángulos de inclinación que fluctúan entre −5º y −15º. Los ángulos de incidencia se hacen tan pequeños como sea posible (típicamente 5º) para darle al borde de corte tanto soporte como sea posible.

Otra diferencia es la forma en que se coloca el filo de corte de la herramienta en posición. Las formas alternas para sostener y presentar el filo de corte de una herramienta de una punta se ilustra en la figura 23.9. La configuración geométrica de una herramienta de acero de alta velocidad se talla sobre una espiga sólida, como se muestra en el inciso a de la figura. El costo más alto, las diferencias en las propiedades y los procesamientos de los materiales más duros para herramienta han dado lugar al uso de insertos soldados o adheridos mecánicamente a un portaherramientas. El inciso b muestra un inserto de carburo cementado soldado a una espiga de herramienta. La espiga está hecha de acero para herramienta a fin de proveer resistencia y tenacidad. El inciso *c*) ilustra un posible diseño para sostener mecánicamente un inserto en un portaherramientas. Se usa la sujeción mecánica para

FIGURA 23.9 Tres formas para sostener y presentar el borde de corte de una herramienta de una punta: *a*) herramienta sólida, típica de los HSS; *b*) inserto soldado, una forma de sostener un inserto de carburo cementado; y *c*) inserto fijo mecánicamente, usado para carburos cementados, cerámicos y otros materiales muy duros.



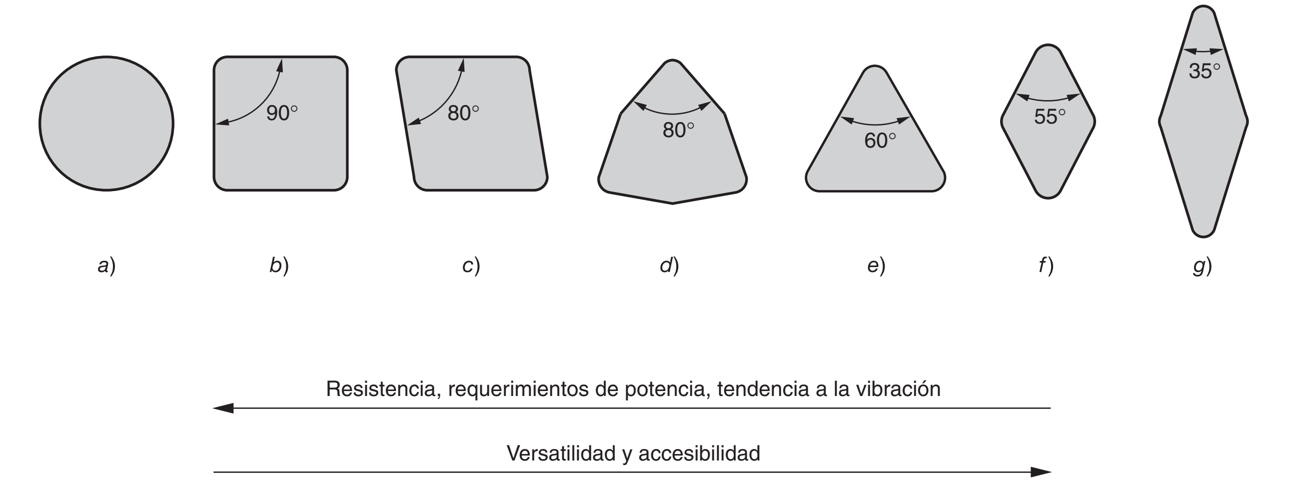


FIGURA 23.10 Formas comunes de insertos: *a*) redondos, *b*) cuadrados, *c*) rombos con dos ángulos de 80º, *d*) hexágono con tres ángulos de 80º, *e*) triángulo (equilátero), *f*) rombo con dos ángulos de 55º, *g*) rombo con dos ángulos de 35°. Asimismo, se muestran las características típicas de su configuración geométrica. La resistencia, los requerimientos de potencia y la tendencia a la vibración aumentan a medida que uno se desplaza a la izquierda; mientras que la versatilidad y la accesibilidad tienden a ser mejores con las configuraciones geométricas de la derecha.

carburos cementados, cerámicos y otros materiales duros. La ventaja significativa del inserto fijado mecánicamente es que cada inserto contiene múltiples bordes o filos cortantes. Cuando un borde se desgasta, se afloja el inserto (se le da vuelta al siguiente borde) y se fija nuevamente en el portaherramientas. Cuando todos los filos se han gastado, se elimina y remplaza el inserto.

Insertos Los insertos para las herramientas de corte se utilizan ampliamente en el maquinado debido a que son económicos y adaptables a muchos tipos diferentes de operaciones de maquinado: el torneado, perforado, roscado, fresado e incluso taladrado. Se encuentran disponibles en una gran variedad de formas y tamaños y se aplican en una extensa variedad de situaciones de corte, en la práctica. En la figura 23.9*c*) se muestra un inserto cuadrado. Otras formas comunes que se utilizan en las operaciones de torneado se muestran en la figura 23.10. En general, se debe seleccionar la punta con mayor ángulo debido a su resistencia y economía. Los insertos redondos poseen puntas con ángulos mayores (y radios de nariz también grandes) debido sólo a su forma. Los insertos con puntas con ángulos mayores son inherentemente más resistentes y con menor probabilidad de que se cincelen con viruta o se rompan durante el corte; sin embargo, requieren más potencia y también están más expuestos a vibraciones. La ventaja, desde el punto de vista económico, de los insertos redondos es que pueden ser indexados un gran número de veces para más cortes por inserto. Los insertos cuadrados presentan cuatro bordes de corte, las formas triangulares tienen tres, mientras que la de forma de rombo tiene solamente dos. El tener menor número de bordes representa una desventaja en costos. Si se puede utilizar ambos lados del inserto (por ejemplo, en la mayoría de las aplicaciones de ángulo de inclinación), entonces el número de bordes de corte se duplica. Las formas en rombo se utilizan (especialmente con ángulos muy cerrados) debido a su versatilidad y accesibilidad cuando se va a llevar a cabo una gran variedad de operaciones. Estas formas pueden colocarse más fácilmente en espacios confinados y se pueden utilizar no solamente en el torneado sino también en el careado, figura 22.6*a*), y en el torneado de contorno, figura 22.6*c*).

Los insertos no se fabrican por lo general con filos de corte perfectamente puntiagudos debido a que un filo puntiagudo es más débil y se fractura de manera más fácil, en especial para los materiales de herramientas muy duros, y frágiles para los que se hacen los insertos (carburos cementados, carburos recubiertos, cermets, cerámicas, CBN y diamante). Algún tipo de alteración de forma se lleva a menudo a cabo en el borde del corte a un nivel casi microscópico. El efecto de esta ***preparación de borde*** es aumentar la resistencia del

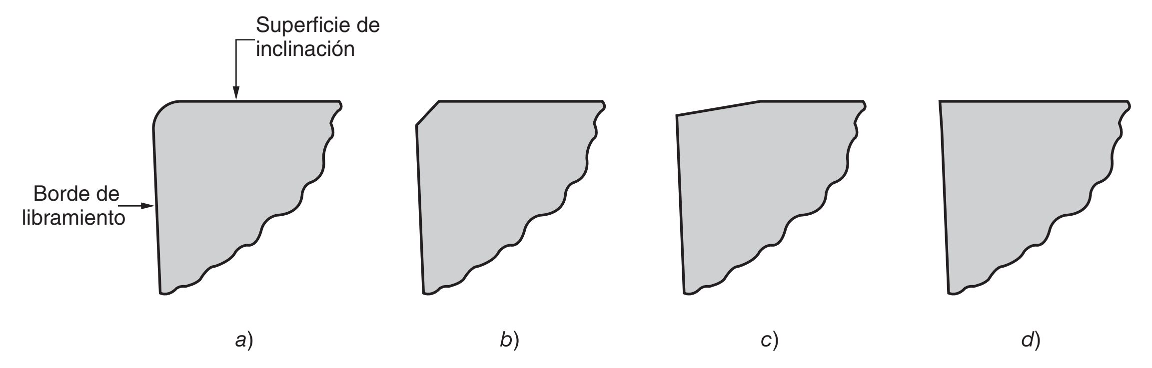


FIGURA 23.11 Tres tipos de preparación de borde que se aplican al borde de corte de un inserto: *a*) radio, *b*) biselado, c) aplanado y *d*) borde perfectamente puntiagudo (sin preparación de borde).

borde cortante, proporcionando una transición gradual entre el borde de seguridad y la cara de inclinación de la herramienta. En la figura 23.11 se muestran tres preparaciones de borde comunes: *a*) redondeo de radio o borde, también conocida como borde afilado, *b*) biselado y *c*) aplanado. Para efectos comparativos, en el inciso *d*) se muestra un borde de corte perfectamente puntiagudo. El radio en *a*) es típicamente de alrededor de 0.025 mm (0.001 in) y el aplanado en *c*) es de 15º o 20º. Las combinaciones de estas preparaciones de borde a menudo se aplican a un borde de corte simple a fin de maximizar el efecto de endurecimiento.

23.3.2 Herramientas de múltiples filos cortantes

La mayoría de las herramientas múltiples de filos cortantes se utilizan en operaciones de maquinado en las que la herramienta gira. Los ejemplos más significativos son el taladrado y el fresado. Por otro lado, algunas operaciones de escariado y aserrado (corte con segueta y con cinta) utilizan herramientas de múltiples filos cortantes que trabajan con un movimiento lineal. Otras operaciones de aserrado (aserrado circular) utilizan hojas de sierra giratorias.

Taladrado con barrenos espirales Se encuentran disponibles varias herramientas de corte para hacer agujeros; sin embargo, el ***barreno espiral*** es la más común de todas. Viene en diámetros que varían desde 0.15 mm (0.006 in) hasta 75 mm (3.0 in). Los barrenos espirales se utilizan ampliamente en la industria para realizar agujeros de manera rápida y económica.

En la figura 23.12 se muestra la configuración geométrica del barreno espiral estándar. El cuerpo del barreno tiene dos ***estrías espirales*** (la espiral le da su nombre al barreno espiral). El ángulo de las estrías espirales se llama ***ángulo de la hélice***, cuyo valor típico es de alrededor de 30º. Mientras se lleva a cabo el taladrado, las estrías espirales actúan como pasadizos para la extracción de viruta del agujero. Aunque es deseable que las aperturas de las estrías sean grandes para proporcionar un espacio máximo para la viruta, el cuerpo del barreno debe estar soportado a lo largo de su longitud. Este soporte lo proporciona el ***alma***, que es el grosor del barreno entre las estrías.

La punta del barreno espiral tiene una forma cónica. Un valor típico del ***ángulo de la punta*** es 118º. La punta puede estar diseñada de varias formas; sin embargo, el diseño más común es ***borde de cincel***, como se muestra en la figura 23.12. Conectado al borde del cincel se encuentran dos bordes de corte (a menudo se les llama labios) que llevan a las estrías. La porción de cada estría adyacente al borde de corte actúa como la superficie de inclinación de la herramienta.

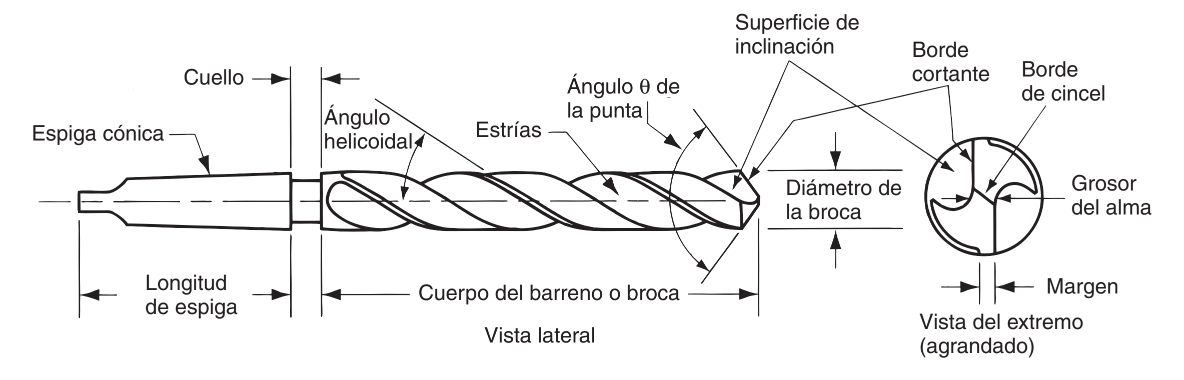


FIGURA 23.12 Configuración geométrica estándar de un barreno espiral.

La acción de corte del barreno espiral es compleja. El giro y avance de la broca trae como consecuencia un movimiento relativo entre los bordes de corte y la pieza de trabajo para formar la rebaba. La velocidad de corte a lo largo de cada borde de corte varía en función de la distancia a partir del eje de rotación. De acuerdo con esto, la eficiencia de la acción de corte varía; la más eficiente es en el diámetro externo de la broca y la menos eficiente, en el centro. De hecho, la velocidad relativa en la punta de la broca es cero, por lo que no se lleva a cabo ningún corte. En lugar de lo anterior, el borde del cincel de la punta de la broca empuja para fuera el material del centro conforme éste penetra en el agujero; se requiere una fuerza de empuje mayor para guiar al barreno espiral hacia delante en el agujero. Asimismo, al comienzo de la operación, el borde giratorio del cincel tiende a dispersarse sobre la superficie de la pieza de trabajo, provocando una pérdida en la precisión de la posición. Se ha inventado varios diseños de brocas alternos para resolver este problema.

La remoción de viruta puede representar un problema en el taladrado. La acción de corte se lleva a cabo dentro del agujero, y las estrías deben proporcionar suficiente espacio a través de la longitud de éste para permitir que la viruta pueda extraerse de él. A medida que se forma la viruta, es forzada a través de las estrías a salir a la superficie de trabajo. La fricción complica las cosas en dos formas. Además de la fricción usual en el corte de metales entre la viruta y la superficie de inclinación del borde de corte, la fricción también trae como consecuencia un tallado entre el diámetro exterior de la broca y el agujero que se está formando. Lo anterior incrementa la temperatura del taladro y del trabajo. Ponerle a la broca un fluido de corte para reducir la fricción y el calor es difícil, ya que la viruta se encuentra fluyendo en la dirección opuesta. Debido a la remoción de viruta y al calor, el uso de un barreno espiral se limita a una profundidad de agujero de cerca de cuatro veces su diámetro. Algunos barrenos espirales están diseñados con agujeros interiores a través de toda su longitud, por medio de los cuales el fluido puede bombearse al agujero cerca de la punta de la broca, entregando así el fluido directamente a la operación de corte. Un método alterno con los barrenos con espirales que no cuentan con agujeros para fluido es utilizar un procedimiento “picoteado” durante la operación de perforado. En dicho procedimiento, el taladro es periódicamente removido del agujero con la finalidad de limpiar la viruta antes de proceder a hacer más profundo el agujero.

Los barrenos espirales se fabrican normalmente con acero de alta velocidad. La configuración geométrica de la broca se fabrica antes de someterla a tratamiento térmico, y después la capa exterior de la broca (bordes de corte y superficies de fricción) es endurecida mientras que retiene en núcleo interior que es relativamente tenaz. Se utiliza la operación de molido para afilar los bordes de corte y darle forma a la broca.

Centros de fresado La clasificación de los cortadores de fresado está íntimamente relacionada con las operaciones de fresado que se describieron en la sección 22.3.1. Los tipos principales de cortadores de fresado son los siguientes:

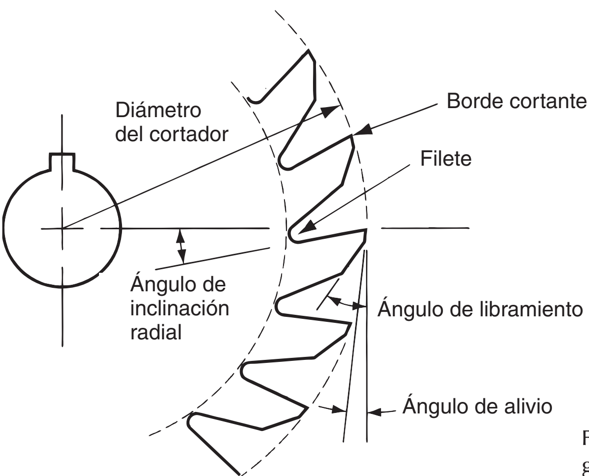
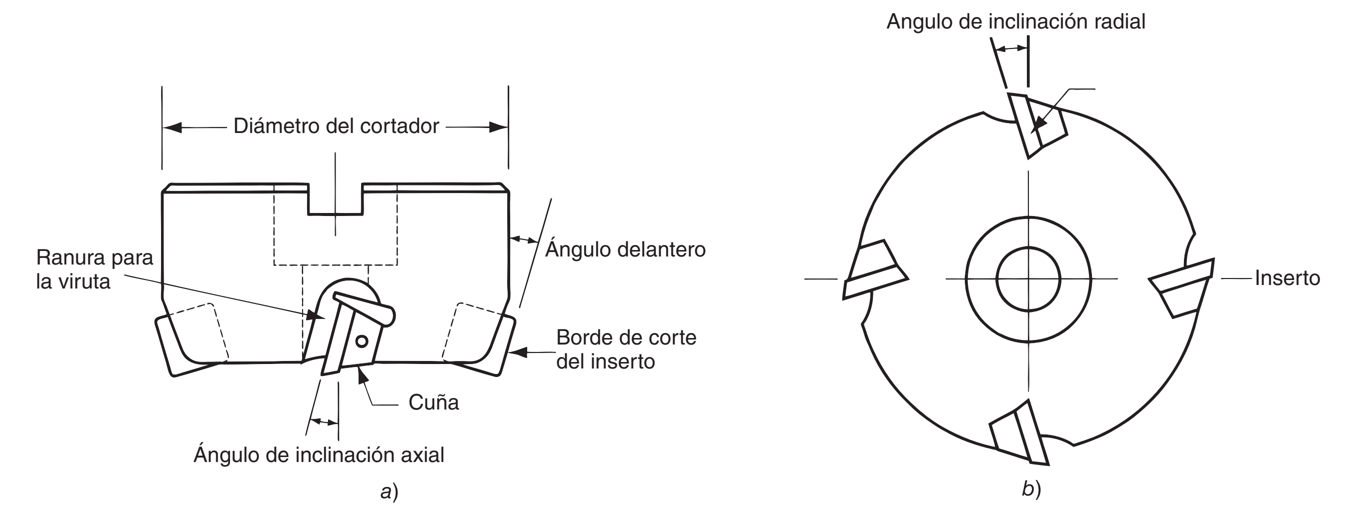


FIGURA 23.13 Elementos de la configuración geométrica de la herramienta de un cortador de fresado de 18 dientes.

- ***Cortadores de fresado simples.*** Se utilizan para el fresado periférico y de placas. Como lo indican las figuras 22.17*a*) y 22.18*b*), son en forma de cilindro con algunas hileras con dientes. Los bordes de corte están normalmente orientados a un ángulo helicoidal (como se muestra en la figura) para reducir el impacto a la entrada del trabajo, y estos cortadores se llaman ***cortadores de fresado helicoidal***. En la figura 23.13 se muestran los elementos de la configuración geométrica de la herramienta de un cortador de fresado simple.
- ***Cortadores de fresado de forma.*** Son cortadores de fresado periférico en el que los bordes de corte tienen un perfil especial que se le impartirá al trabajo. Una aplicación importante es en la fabricación de engranes, en la que el cortador del fresado de forma se moldea para cortar las ranuras entre los dientes del engrane adyacente, por ende, dejando la forma de los dientes de engrane.
- ***Cortadores de fresado frontal.*** Están diseñados con dientes que cortan tanto en el lado lateral como en la periferia del cortador. Los cortadores de fresado frontal pueden fabricarse de HSS, como en la figura 22.17*b*), o estar diseñados para usar insertos de carburos cementados. La figura 23.14 muestra un cortador de fresado frontal de cuatro dientes que utiliza insertos.

FIGURA 23.14 Elementos de la configuración geométrica de un cortador de fresado frontal con cuatro dientes: *a*) vista lateral y *b*) vista superior.



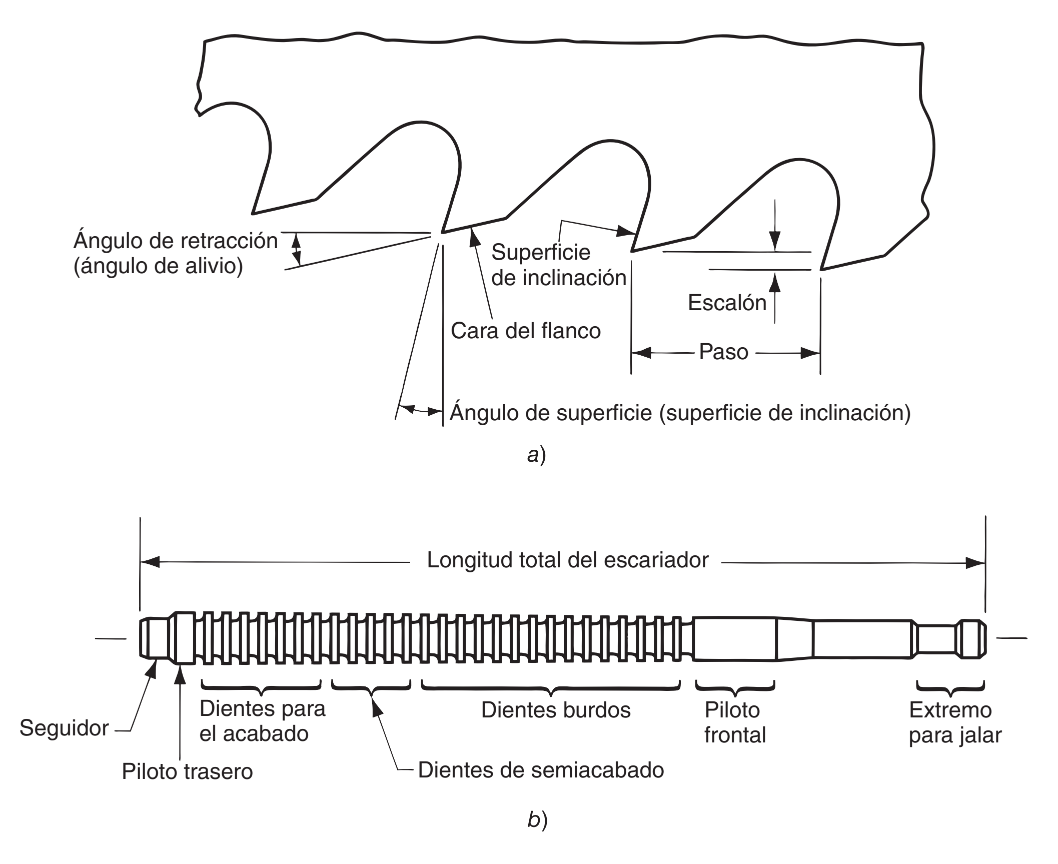


FIGURA 23.15 La brocha: *a*) terminología de la configuración geométrica de los dientes y *b*) una brocha típica utilizada en el brochado interior.

➢ ***Cortadores de fresado terminal.*** Como se muestra en la figura 22.20*c*), un cortador de fresado terminal tiene apariencia de una broca; sin embargo, una inspección más detallada muestra que está diseñado para el corte primario con sus dientes en la periferia en lugar de en sus extremos. (Una broca corta solamente en su extremo conforme penetra en el trabajo). Las fresadoras terminales están diseñadas con extremos cuadrados, extremos con radios y extremos en forma de bola. Las fresadoras terminales pueden utilizarse para fresado frontal, fresador de perfiles y embolsado, ranuras de corte, grabado, contorneado de superficies y avellanado del troquel.

Brochas La terminología y configuración geométrica de la brocha se muestra en la figura 23.15. La brocha consiste en una serie de dientes para corte a través de su longitud. El avance se logra mediante el espacio que existe entre dientes sucesivos en la brocha. Esta acción de avance es única en las operaciones de maquinado, puesto que la mayoría de las operaciones logran el avance mediante un movimiento relativo que se lleva a cabo en la herramienta o en el trabajo. Todo el material que se remueve en un solo pase de la brocha es el resultado acumulativo de todos los pasos de la herramienta. El movimiento acelerado se logra mediante el viaje lineal de la herramienta al pasar por la superficie de trabajo. La forma de la superficie de corte está determinada por el contorno de los bordes de corte en la brocha, particularmente, del borde cortante final. Debido a su complejidad geométrica y a las bajas velocidades utilizadas en el brochado, la mayoría de las brochas están hechas de HSS. En el brochado de cierto tipo de hierro para fundición, los bordes de corte son insertos de carburos cementados soldados o mecánicamente sujetos en su lugar en la herramienta de brochado.

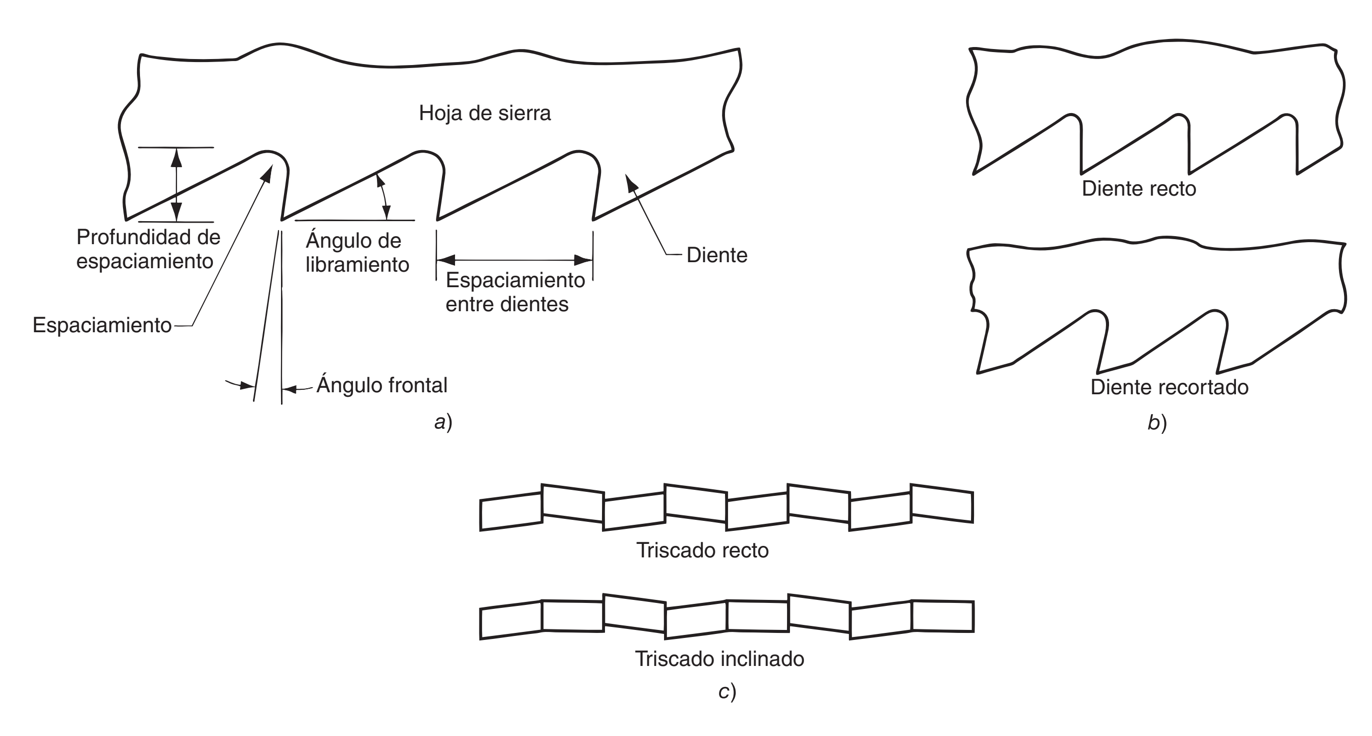


FIGURA 23.16 Características de las hojas de la sierra: *a*) nomenclatura de las configuraciones geométricas de la hoja de sierra, *b*) dos formas comunes de diente y *c*) dos tipos de triscado de dientes.

Hojas con sierra Para cada una de las tres operaciones de aserrado (sección 22.5.3), las hojas de la sierra tienen ciertas características comunes, incluyendo la forma de los dientes, el espaciado entre los mismos y su disposición, como se puede observar en al figura 23.16. La ***forma de los dientes*** tiene que ver con la configuración geométrica de cada diente de corte. El ángulo de inclinación, ángulo de espacio, espaciado entre dientes y otras características geométricas se muestran en la figura 23.16*a*). El ***espaciado entre dientes*** es la distancia entre dientes adyacentes de la sierra. Este parámetro determina el tamaño de los dientes y el espaciamiento entre dientes. El espaciamiento proporciona el espacio para la formación de la viruta por los dientes de corte adyacentes. Las diferentes formas de dientes son más o menos adecuadas para los diferentes materiales de trabajo y condiciones de corte. En la figura 23.16*b*) se muestran dos formas comúnmente utilizadas en corte con segueta y aserrado con cinta. La ***disposición dentada (triscado)***permite que el corte por la hoja de la sierra sea más amplio que el ancho de la sierra misma; de otra forma la hoja se podría pegar en las paredes del corte hecho por la sierra. En la figura 23.16*c*) se muestran dos triscados comunes con sierra.

23.4 FLUIDOS PARA CORTE

Un ***fluido para corte*** es un líquido o gas que se aplica directamente a la operación de maquinado para mejorar el desempeño del corte. Los dos problemas principales que atienden los fluidos para corte son: 1) la generación de calor en las zonas de corte y fricción y 2) fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo. Además de la remoción del calor y la reducción de la fricción, los fluidos para corte brindan beneficios adicionales como: lavado de las virutas (especialmente en esmerilado y fresado), reducción de la temperatura de la pieza de trabajo para un manejo más fácil, disminuir las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia, mejorar la estabilidad dimensional de la pieza de trabajo y optimizar el acabado superficial.

23.4.1 Tipos de fluidos para corte

Se dispone de varios fluidos para corte comerciales. Es conveniente analizarlos atendiendo primero a su función, para después clasificarlos por su composición química.

Funciones de los fluidos para corte De acuerdo con los dos principales problemas de los fluidos para corte, hay dos categorías generales: refrigerantes y lubricantes. Los ***refrigerantes*** son fluidos para corte diseñados para reducir los efectos del calor en las operaciones de maquinado. Tienen efecto limitado sobre la magnitud de energía calorífica generada durante el corte, pero extraen el calor que se genera; de esta manera se reduce la temperatura de la herramienta y de la pieza de trabajo, y ayuda a prolongar la vida de la herramienta de corte. La capacidad que tiene un fluido para corte de reducir la temperatura del maquinado depende de sus propiedades térmicas. El calor específico y la conductividad térmica son las propiedades más importantes (sección 4.2.1). El agua tiene un calor específico y una conductividad térmica relativamente mayores respecto a otros líquidos; por esta razón se utiliza como base de los fluidos para corte de tipo refrigerante. Estas propiedades le permiten al refrigerante extraer el calor de la operación, reduciendo así la temperatura de la herramienta de corte.

Los fluidos para corte tipo refrigerante parecen ser más efectivos a velocidades de corte relativamente altas, donde la generación del calor y las altas temperaturas son un problema. Son más efectivos en los materiales susceptibles a las fallas por temperatura, como los aceros de alta velocidad, y se usan frecuentemente en operaciones de torneado y fresado donde se genera calor en grandes cantidades. Por lo general, los refrigerantes son soluciones o emulsiones en agua debido a que ésta tiene propiedades térmicas ideales en estos fluidos para corte.

Los ***lubricantes*** son fluidos basados generalmente en aceite (por sus buenas propiedades lubricantes), formulados para reducir la fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo. Los fluidos lubricantes de corte operan por ***lubricación de presión extrema***, una forma especial de lubricación que involucra la formación de una capa delgada de sales sólidas sobre la superficie caliente y limpia del material a través de reacciones químicas con el lubricante. Los compuestos de azufre, cloro y fósforo del lubricante causan la formación de estas capas superficiales, que actúan para separar las dos superficies metálicas (es decir, de la viruta y de la herramienta). Las películas de presión extrema son significativamente más efectivas para reducir la fricción en el corte de metales que en la lubricación convencional que se basa en la presencia de películas de líquidos entre las dos superficies.

Los fluidos para procesos de corte tipo lubricante son más efectivos a velocidades bajas de corte; tienden a perder su efectividad a altas velocidades (arriba de aproximadamente 120 m/min, 400 ft/min), debido a que el movimiento de la viruta a estas velocidades previene que el fluido para corte alcance la interfaz herramienta-viruta. Además de las altas temperaturas de corte que generan estas velocidades, los aceites se vaporizan antes de que puedan lubricar. Las operaciones de maquinado como el taladrado y el roscado se benefician por lo general de los lubricantes. En estas operaciones se retarda la formación de materiales acumulados en el filo de corte y se reduce el momento de torsión de la herramienta.

Aunque el propósito principal de un lubricante es reducir la fricción, también reduce la temperatura a través de varios mecanismos. En primer lugar, el calor específico y la conductividad térmica del lubricante ayudan a remover el calor de la operación, reduciendo por tanto la temperatura. En segundo lugar, debido a que se reduce la fricción, también se reduce el calor generado como resultado de la fricción. En tercer lugar, un coeficiente más bajo de fricción se traduce en un menor ángulo de fricción. De acuerdo con la ecuación de Merchant (ecuación 21.16), un menor ángulo de fricción ocasiona un aumento del ángulo del plano cortante; por consiguiente, la magnitud de la energía calorífica generada en la zona de corte se reduce. Hay un efecto típico de traslape entre los tipos de fluidos para corte. Los refrigerantes se formulan con ingredientes que ayudan a reducir la fricción. Y los lubricantes tienen propiedades térmicas, que aunque no son tan buenas como las del agua,

actúan para remover el calor de la operación de corte. Los fluidos para corte (refrigerantes y lubricantes) ponen de manifiesto su efecto en la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta a través de valores más altos de C. Son típicos los incrementos de 10 a 40%. La pendiente n no se afecta significativamente.

Formulación química de los fluidos para corte Hay tres categorías básicas de fluidos para corte de acuerdo con su formulación química: 1) aceites para corte, 2) aceites emulsificados, 3) fluidos semiquímicos y 4) fluidos químicos. Todos estos fluidos para corte proporcionan funciones refrigerantes y lubricantes. Los aceites de corte son más eficientes como lubricantes, mientras que las otras tres categorías son más eficientes como refrigerantes, ya que están formados principalmente por agua.

Los ***aceites para corte*** son fluidos basados en aceites derivados del petróleo, de origen animal, marino o vegetal. Los aceites minerales (basados en petróleo) son los principales debido a su abundancia y generalmente por sus características lubricantes deseables. Para lograr la máxima capacidad de lubricación se combinan frecuentemente todos los tipos de aceite en un mismo fluido. También se mezclan aditivos químicos para incrementar las cualidades lubricantes. Estos aditivos contienen compuestos de azufre, cloro o fósforo y se diseñan para reaccionar químicamente con las superficies de la herramienta y de la viruta para formar películas sólidas (lubricación por presión extrema), que ayudan a evitar el contacto metal y metal.

Los ***aceites emulsificados*** son fluidos que forman suspensiones de pequeñas gotas de aceite en agua. El fluido se hace mezclando aceite (mineral por lo general) en agua, y se utiliza un agente emulsificante para promover la mezcla y estabilidad de la emulsión. Una relación típica entre agua y aceite es de 30:1. Se usan frecuentemente aditivos químicos basados en azufre, cloro y fósforo para promover la lubricación a presión extrema. Debido a que contienen aceite y agua, los aceites emulsificantes combinan las cualidades de lubricación y refrigeración en un solo fluido para corte.

Los ***fluidos químicos*** son sustancias químicas disueltas en agua, más que aceites en emulsión. Las sustancias químicas disueltas son compuestos de azufre, cloro o fósforo y agentes humectantes. Las sustancias químicas se destinan a suministrar algún grado de lubricación a la solución. Los fluidos químicos tienen buenas propiedades refrigerantes, pero sus cualidades lubricantes son menores que las de los otros tipos de fluidos. Los ***fluidos semiquímicos*** son fluidos químicos que contienen pequeñas cantidades de aceite emulsificado para incrementar las características lubricantes del fluido para corte. De hecho es una clase híbrida entre fluidos químicos y aceites emulsificantes.

23.4.2 Aplicación de los fluidos para corte

Los fluidos para corte se aplican a las operaciones de maquinado en varias formas. En esta sección se considera éstas técnicas de aplicación. Asimismo, se considera el problema de la contaminación del fluido para corte y qué medidas se pueden tomar para resolver este problema.

Métodos de aplicación El método más común es la ***inundación***, llamada algunas veces enfriamiento por inundación, debido a que se usa generalmente con fluidos de enfriamiento. En este método se dirige una corriente constante de fluido hacia la interfaz herramienta-trabajo o herramienta-viruta de la operación de maquinado. Un segundo método consiste en la ***aplicación de niebla***, usada principalmente en fluidos para corte basados en agua. En este método se dirige el fluido hacia la operación en forma de niebla acarreada a alta velocidad por una corriente de aire presurizado. La aplicación de niebla no es generalmente tan efectiva como la inundación de la herramienta de corte. Sin embargo, debido a la alta velocidad de la corriente de aire, la aplicación de niebla puede ser más efectiva para llevar el fluido de corte a áreas inaccesibles que no pueden ser alcanzadas por la inundación convencional.

Se usa la ***aplicación manual*** del fluido de corte por medio de una aceitera o brocha para aplicar lubricantes en operaciones de roscado, y otras donde las velocidades de corte son bajas y la fricción es un problema. La mayoría de los talleres de maquinado en producción prefieren generalmente no usar esta técnica debido a la variabilidad de su aplicación.

Filtración de los fluidos para corte y maquinado en seco Los fluidos para corte se contaminan al cabo del tiempo con una variedad de sustancias extrañas. Estos contaminantes incluyen aceites sucios (aceite de máquina, fluidos hidráulicos, etc.), basura (colillas de cigarro, alimentos, etc.), pequeñas virutas, hongos y bacterias. Además de causar malos olores y riesgos a la salud, los fluidos para corte contaminados no desempeñan sus funciones tan bien. Algunas alternativas para manejar este problema son las siguientes: 1) remplazar el fluido para corte a intervalos regulares y frecuentes (quizá dos veces por mes), 2) usar un sistema de filtración continuamente o en forma periódica para limpiar el fluido o 3) maquinar en seco, es decir, realizar el maquinado sin fluidos para corte. Debido al crecimiento de la conciencia ambiental y a la legislación asociada con la contaminación, la eliminación de los fluidos gastados se ha vuelto costosa y contraria al bienestar público general.

Se han instalado sistemas de filtración en numerosos talleres de máquinas para resolver los problemas de contaminación. Las ventajas de estos sistemas incluyen: 1) prolongación de la vida de los fluidos para corte entre cambios, en lugar de remplazar el fluido una o dos veces por mes, se han reportado vidas de refrigerantes hasta de un año; 2) se reducen los costos de disposición de los fluidos, ya que ésta es mucho menos frecuente cuando se usan filtros; 3) fluidos para corte más limpio para un mejor ambiente de trabajo y reducción de los riesgos contra la salud; 4) menor mantenimiento de las máquinas herramienta y 5) una vida más larga de las herramientas. Hay varios tipos de sistemas para filtrar los fluidos para corte. Para el lector interesado, en la referencia [20] se estudian los sistemas de filtrado y los beneficios que se obtienen al usarlos.

La tercera opción se llama ***maquinado en seco***, lo que significa que no se utiliza ningún fluido para corte. El maquinado en seco evita los problemas asociados con la contaminación del fluido para corte, su desecho y filtración; sin embargo, puede presentar problemas por sí mismo: 1) sobrecalentar la herramienta, 2) operación a velocidades de corte y de producción más bajas para prolongar la vida de la herramienta y 3) adolecer de los beneficios de la remoción de viruta en el molido y el fresado. Los fabricantes de herramientas para corte han implantado ciertos grados de carburos y carburos con revestimiento para su uso en el maquinado en seco.

REFERENCIAS

[1] Aronson, R. B., "Using High-Pressure Fluids", ***Manufacturing Engineering***, junio de 2004, pp. 87-96.

[2] Brierley, R. G. y Siekman, H. J., ***Machining Principles and Cost Control***, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1964.

[3] Carnes, R. y Maddock, G., "Tools Steel Selection" ***Advanced, Materials & Processes,*** junio de 2004, pp. 37-40.

[4] Cook, N. H., "Tool Wear and Tool Life", ***ASME Transactions, J. Engrg. For Industry***, vol. 95, noviembre de 1973, pp. 931-938.

[5] Davis, J. R. (ed.), ***ASM Specialty Handbook® Tool Materials***, ASM International, Materials Park, Ohio, 1995.

[6] Destephani, J., "The Science of pCBN", ***Manufacturing Engineering***, enero de 2005, pp. 53-62.

[7] Drozda, T. J. y Wick, C. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. I, ***Machining***, Society of Manufacturing Engineers, Dearbon, Mich., 1983.

[8] Esford, D., "Ceramics Take a Turn", ***Cutting Tool Engineering***, vol. 52, núm. 7, julio de 2000, pp. 40-46.

[9] Graham, D., "Dry Out", ***Cutting Tool Engineering***, vol. 52, núm. 3, marzo de 2000, pp. 56-65.

[10] Koelsch, J. R., "Beyond Tin", ***Manufacturing Engineering***, octubre de 1992, pp. 27-32.

[11] Krar, S. F. y Ratterman, E., ***Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond,*** McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1990.

[12] Liebhold, P., "The History of Tools", ***Cutting Tool Engineer***, junio de 1989, pp. 137-138.

[13] ***Machining Data Handbook***, 3a. ed., vols. I y II. Metcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio, 1980.

[14] ***Metals Hanbook***, 9a. ed., vol. 16, ***Machining***, ASM International, Metals Park, Ohio, 1989.

[15] ***Modern Metal Cutting***, AB Sandvik Coromant, Sandvik, Suecia, 1994.

[16] Nelson, A., "Treat Your Fluids Right", ***Manufacturing Engineering***, junio de 2004, pp. 79-84.

[17] Owen, J.V., "Are Cermets for Real?", ***Manufacturing Engineering***, octubre de 1991, pp. 28-31.

[18] Pfouts, W.R., “Cutting Edge Coatings”, ***Manufacturing Engineering***, julio de 2000, pp. 98-107.
[19] Schey, J. A., ***Introduction to Manufacturing Processes***, 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.
[20] Shaw, M. C., ***Metal Cutting Principles***, 2a. ed., Oxford University Press, Inc., Oxford, Inglaterra, 2005.
[21] Spitler, D. (ed.), ***Fundamentals of Tool Design***, 5a. ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 2003.
[22] Tlusty, J., ***Manufacturing Processes and Equipment***, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2000.

PREGUNTAS DE REPASO

23.1. ¿Cuáles son los dos aspectos principales de la tecnología de herramientas de corte?
23.2. Mencione los tres modos de falla de la herramienta de maquinado.
23.3. ¿Cuáles son los dos principales lugares de una herramienta de corte donde ocurre el desgaste?
23.4. Identifique los mecanismos de desgaste de la herramienta de corte.
23.5. ¿Qué significa el parámetro *C* en la ecuación de vida de la herramienta de Taylor?
23.6. ¿Qué otras variables además de la velocidad de corte se incluyen en la versión aumentada de la ecuación de Taylor?
23.7. ¿Cuáles son algunos de los criterios de vida en la herramienta usados en las operaciones de maquinado en producción?
23.8. Identifique tres propiedades deseables de un material para herramienta de corte.
23.9. ¿Cuáles son los elementos principales de aleación de los aceros de alta velocidad?
23.10. ¿Cuál es la diferencia de ingredientes entre los carburos cementados grado corte de acero y grado corte de materiales que no son aceros?
23.11. Identifique algunos de los compuestos comunes que forman los recubrimientos delgados sobre la superficie de los insertos de carburo recubierto.
23.12. Mencione los siete elementos de la configuración geométrica de herramientas para una herramienta de corte de una punta.
23.13. ¿Por qué se diseñan generalmente las herramientas cerámicas de corte con ángulos de inclinación negativos?
23.14. Identifique las formas alternas para sujetar una herramienta de corte en su lugar durante el maquinado.
23.15. Mencione las dos categorías principales de fluidos para corte de acuerdo con su función.
23.16. Mencione los cuatro tipos principales de fluidos para corte de acuerdo con su composición química.
23.17. ¿Cuál es el principal mecanismo lubricante mediante el cual trabajan los fluidos para corte?
23.18. ¿Cuáles son los métodos de aplicación de los fluidos para corte en una operación de maquinado?
23.19. ¿Por qué los sistemas de filtrado de fluidos se hacen cada día más comunes y cuáles son sus ventajas?
23.20. El maquinado en seco está siendo evaluado en tiendas de máquinas debido a que presenta ciertos problemas inherentes en el uso de fluidos para corte. ¿Cuáles son los problemas asociados con el uso de fluidos para corte?
23.21. ¿Cuáles son algunos de los nuevos problemas que presenta el maquinado en seco?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 19 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

23.1. De las siguientes condiciones de corte, ¿cuál tiene el efecto mayor en el desgaste de la herramienta?: *a*) velocidad de corte, *b*) profundidad de corte o *c*) avance.
23.2. Como ingrediente de aleación en el acero de alta velocidad, ¿cuál de las siguientes funciones tiene el tungsteno? (dos mejores respuestas): *a*) forma carburos duros para resistir la abrasión, *b*) mejora la resistencia y la dureza, *c*) aumenta la resistencia a la corrosión, *d*) incrementa la dureza en caliente y *e*) aumenta la tenacidad.
23.3. ¿Cuáles son los siguientes ingredientes principales que contienen típicamente las aleaciones de fundición de cobalto? (tres respuestas mejores): *a*) aluminio, *b*) cobalto, *c*) cromo, *d*) níquel, *e*) acero y *f*) tungsteno.
23.4. ¿Cuál de los siguientes no es un ingrediente común de las herramientas de corte de carburo cementado? (dos respuestas correctas): *a*) Al_2O_3, *b*) Co, *c*) CrC, *d*) TiC y *e*) WC.

23.5. ¿Cuál de los siguientes efectos sobre los carburos cementados WC-Co tiene un incremento en el contenido de cobalto? *a*) disminuye la dureza, *b*) disminuye la resistencia a la ruptura transversal, *c*) incrementa la dureza, *d*) incrementa la tenacidad y *e*) incrementa la resistencia al desgaste.

23.6. ¿Por cuáles de los siguientes ingredientes se caracterizan típicamente los grados de corte de acero de los carburos cementados? (tres respuestas correctas): *a*) Co, *b*) Fe, *c*) Mo, *d*) Ni, *e*) Tic y *f*) WC.

23.7. Si usted ha seleccionado un carburo cementado para una aplicación que involucra el acabado en torno de un acero, ¿qué grado C seleccionaría usted? (una mejor respuesta): *a*) C1, *b*) C3, *c*) C5 o *d*) C7.

23.8. ¿Cuál de los siguientes procesos se usa para proveer los recubrimientos delgados sobre la superficie de un inserto de carburo recubierto? (dos mejores respuestas): *a*) deposición química de vapor, *b*) galvanoplastia, *c*) deposición física de vapor, *d*) prensado y sinterizado y *e*) pintado con aerosol.

23.9. Cuál de los siguientes materiales tiene una dureza más alta?: *a*) óxido de aluminio, *b*) nitruro de boro cúbico, *c*) acero de alta velocidad, *d*) carburo de titanio o *e*) carburo de tungsteno.

23.10. ¿Cuál de las siguientes son las dos funciones principales de un fluido para corte en maquinado? (dos mejores respuestas): *a*) mejorar el acabado superficial de la pieza de trabajo, *b*) reducir las fuerzas y la potencia, *c*) reducir la fricción en la interfaz herramienta-viruta, *d*) remover el calor de los procesos o *e*) lavado de la viruta.

PROBLEMAS

Vida de las herramientas y ecuación de Taylor

23.1. Los siguientes datos de desgaste de flanco se recopilaron en una serie de pruebas de torneado usando una herramienta de carburo recubierto sobre un acero endurecido a un avance de 0.30 mm/rev y una profundidad de 4.0 mm. A una velocidad de 125 m/min, un desgaste del flanco es de 0.12 mm a 1 min, 0.27 mm a 5 min, 0.45 mm a 11 min, 0.58 mm a 15 min, 0.73 a 20 min y 0.97 mm a 25 min. A una velocidad de 165 m/min, el desgaste del flanco es de 0.22 mm a 1 min, 0.47 mm a 5 min, 0.70 mm a 9 min, 0.80 mm a 11 min y 0.99 mm a 13 min. El último valor en cada caso es cuando se presenta una falla final de la herramienta. *a*) En un pedazo de papel lineal gráfico, grafique el desgaste del flanco en función del tiempo. Utilizando 0.75 mm de desgaste del flanco como un criterio para la falla de la herramienta, determine el periodo de vida de la herramienta a las dos velocidades de corte. *b*) En papel logarítmico natural, grafique los resultados a los que llegó en el inciso anterior. A partir de la gráfica, determine los valores de *n* y *C* en la ecuación de Taylor de periodo de vida. *c*) A manera de comparación, calcule los valores de *n* y *C* en la ecuación de Taylor resolviendo las ecuaciones simultáneas. ¿Son los valores resultantes de *n* y *C* los mismos?

23.2. Resuelva el problema 23.1, considerando que el criterio del periodo de vida de la herramienta es de 0.50 mm de desgaste del flanco en lugar de 0.75 mm.

23.3. Se llevó a cabo una serie de pruebas de torneado utilizando una herramienta de carburo cementado y se obtuvieron, datos acerca del desgaste del flanco. El avance fue de 0.010 in/rev y la profundidad de 0.125 in. A una velocidad de 350 ft/min, el desgaste del flanco es de 0.005 in en 1 min, 0.008 in en 5 min, 0.012 in en 11 min, 0.0015 in en 15 min, 0.021 in en 20 min y 0.040 in en 25 min. A una velocidad de 450 ft/min, el desgaste del flanco es de 0.007 in en 1 min, 0.017 in en 5 min, 0.027 in en 9 min, 0.33 in en 11 min y 0.040 in en 13 min. El último valor en cada caso es cuando se presenta la falla final de la herramienta. *a*) En un pedazo de papel gráfico lineal, grafique el desgaste del flanco en función del tiempo. Utilizando 0.020 in de desgaste del flanco como criterio de la falla de la herramienta, determine los tiempos de vida para las dos velocidades de corte. *b*) En un pedazo de papel logarítmico natural, grafique los resultados que obtuvo en el inciso anterior. A partir de la gráfica, determine los valores de *n* y *C* en la ecuación de Taylor de la vida de la herramienta. *c*) A manera de comparación, calcule los valores de *n* y *C* en la ecuación de Taylor, resolviendo las ecuaciones simultáneas. ¿Son los valores resultantes de *n* y *C* los mismos?

23.4. Resuelva el problema 23.3, considerando que el criterio de desgaste de la vida de la herramienta es de 0.015 in de desgaste del flanco. ¿Qué velocidad de corte se debe utilizar para obtener un tiempo de vida de la herramienta de 20 min?

23.5. La prueba de la vida de la herramienta en un torno ha arrojado los datos siguientes: 1) a una velocidad de corte de 375 ft/min, la vida de la herramienta fue de 5.5 min; 2) a una velocidad de corte de 275 ft/min, la vida de la herramienta fue de 53 min. a) Determine los parámetros *n* y *C* en la ecuación de Taylor de vida de la herramienta. b) Basado en los valores de *n* y *C*, ¿cuál es el material probable de herramienta usado en esta operación? c) Usando su propia ecuación, calcule la vida de la herramienta que corresponde a una velocidad de corte de 300 ft/min. d) Calcule la velocidad de corte que corresponde a una vida de la herramienta $T = 10$ min.

23.6. Una prueba de vida de la herramienta en torneado arrojó los siguientes datos: *a*) cuando la velocidad de corte es de 100 m/min, la vida de la herramienta es de 10 min; 2) cuando la velocidad de corte es de 75 m/min, la vida de la herramienta es de 30 min. *a*) Determine los valores de *n* y *C* en la ecuación de Taylor de vida de la herramienta. Con base en su ecuación, calcule *b*) la vida de la herramienta a una velocidad de 110 m/min y *c*) la velocidad correspondiente a una vida de la herramienta de 15 min.

23.7. En una prueba de torneado resultó una vida de herramienta de 1 min a una velocidad de corte de 4.0 m/s y una vida de herramienta de 20 min a una velocidad de 2.0 m/s. *a*) Encuentre los valores de *n* y *C* en la ecuación de vida de la herramienta de Taylor. *b*) Proyecte la duración de la herramienta a una velocidad de 1.0 m/s.

23.8. Una pieza de trabajo de 15.0 in por 2.0 in se maquina en una operación de fresado frontal utilizando un cortador de 2.5 in de diámetro con un solo inserto de carburo. La máquina se configura para un avance de 0.010 in/diente y una profundidad de 0.20 in. Si la velocidad de corte es de 400 ft/min, la herramienta dura tres piezas. Si se utiliza una velocidad de corte de 200 ft/min, la herramienta dura 12 piezas. Determine la ecuación de Taylor de la vida de la herramienta.

23.9. En una operación de producción de torneado, la pieza de trabajo tiene 125 mm de diámetro y 300 mm de largo. Se usa una velocidad de avance de 0.225 mm/rev en la operación. Si se usa una velocidad de corte de 3.0 m/s la herramienta debe cambiarse cada cinco piezas de trabajo; pero si la velocidad de corte es de 2.0 m/s, la herramienta puede producir 25 piezas entre los cambios de herramienta. Determine la ecuación de vida de la herramienta de Taylor para este trabajo.

23.10. Para la gráfica de la vida de la herramienta de la figura 23.5, demuestre que el punto central de los datos ($v = 130$ m/min, $T = 12$ min) es consistente con la ecuación de Taylor determinada en el ejemplo 23.1.

23.11. En las gráficas de desgaste de la herramienta de la figura 23.4, se indica la falla completa de la herramienta de corte con una X a final de cada curva de desgaste. Usando el criterio de falla completa como criterio de vida de la herramienta en lugar de 0.050 mm de desgaste de flanco o superficie de incidencia, los datos resultantes son: 1) $v = 160$ m/min, $T = 5.75$ min; 2) $v = 130$ m/min, $T = 14.25$ min; y 3) $v = 100$ m/min, $T = 47$ min. Determine los parámetros n y C para estos datos en la ecuación de vida de la herramienta de Taylor.

23.12. La ecuación de Taylor para un cierto conjunto de condiciones de prueba es $vT^{0.25} = 1\,000$, donde se usan las unidades acostumbradas en Estados Unidos: ft/min para v y minutos para T. Convierta esta ecuación a la ecuación de Taylor equivalente en unidades del Sistema Internacional, donde v esté en m/s y T esté en segundos. Valide la ecuación métrica usando una vida de la herramienta de 16 min. Esto es, calcule la velocidad de corte correspondiente en ft/min y m/s usando las dos ecuaciones.

23.13. Se ejecuta una serie de pruebas de torneado para determinar los parámetros n, m y K en la versión aumentada de la ecuación de Taylor (ecuación 23.4). Los siguientes datos se obtuvieron durante la prueba: 1) velocidad de corte de 1.9 m/s, avance de 0.22 mm/rev, vida de la herramienta de 10 min; 2) velocidad de corte de 1.3 m/s, avance de 0.22 mm/rev, vida de la herramienta de 47 min; y 3) velocidad de corte de 1.9 m/s, avance de 0.32 mm/rev, vida de la herramienta de 8 min. a) Determine n, m y K. b) Utilizando su ecuación, calcule la vida de herramienta cuando la velocidad de corte es de 1.5 m/s y el avance es de 0.28 mm/rev.

23.14. La ecuación (23.4) en el texto relaciona la vida de herramienta con la velocidad y el avance. En una serie de pruebas de torneado que se condujeron con el fin de determinar los parámetros n, m y K, se recolectaron los datos siguientes: 1) $v = 400$ ft/min, $f = 0.010$ in/rev, $T = 10$ min; 2) $v = 300$ ft/min, $f = 0.010$ in/rev, $T = 35$ min; y 3) $v = 400$ ft/min, $f = 0.015$ in/rev, $T = 8$ min. Determine n, m y K. ¿Cuál es la interpretación física de la constante K?

23.15. En la tabla 23.2, los valores de n y C se basan en una velocidad de avance de 0.25 mm/rev y una profundidad de corte de 2.5 mm. Determine cuántos milímetros cúbicos de acero podrían moverse por cada uno de los siguientes materiales de herramienta, si se requiriera una vida de la herramienta de 10 min en cada caso: *a*) acero simple al carbono, *b*) acero de alta velocidad, *c*) carburo cementado, *d*) cerámico.

23.16. Se ejecuta una operación de taladrado en la cual se taladran agujeros de 0.5 in de diámetro a través de placas de fundición de hierro que tienen 1.0 in de grueso. Se ha taladrado agujeros de muestra para determinar la vida de la herramienta a dos velocidades de corte. A 80 ft/min superficiales la herramienta duró exactamente 50 agujeros. A 120 ft/min superficiales la herramienta duró exactamente 5 agujeros. La velocidad de avance del taladro fue de 0.003 in/rev (ignore los efectos de la entrada y salida de la broca del agujero). Considere la profundidad del corte de exactamente 1.0 in, el cual corresponde al espesor de la placa. Determine los valores de n y C en la ecuación de Taylor con estos datos de muestra, en la cual la velocidad de corte v se exprese en ft/min y la vida de la herramienta T se exprese en minutos.

23.17. Se va a tornear el diámetro exterior de un cilindro fabricado de una aleación de titanio. El diámetro inicial es de 400 mm y la longitud de 1 100 mm. El avance es de 0.35 mm/rev y la profundidad de corte es de 2.5 mm. El corte se realizará con una herramienta de corte de carburo cementado cuyos parámetros de vida de herramienta de Taylor son: $n = 0.24$ y $C = 450$. Las unidades para la ecuación de Taylor son minutos para la vida de herramienta y m/min para la velocidad de corte. Calcule la velocidad de corte que permitirá que la vida de la herramienta sea exactamente igual al tiempo de corte para esta pieza.

23.18. Se va a tornear el diámetro exterior de un rodillo de una fresadora de rodillo de acero. En el pase final, el diámetro inicial es de 26.25 in y la longitud es de 48.0 in. Las condiciones de corte serán: avance de 0.0125 in/rev y la profundidad de corte de 0.125 in. Se utilizará una herramienta de corte de carburo cementado y los parámetros de la ecuación de vida de la herramienta de Taylor para esta configuración son: $n = 0.25$ y $C = 1\,300$. Las unidades de la ecuación de Taylor están en min para la vida de la herramienta y en ft/min para la velocidad de corte. Es recomendable que se opere a una velocidad de corte tal que la herramienta no necesite cambiarse durante el corte. Determine la velocidad de corte que hará que la vida de la herramienta sea igual al tiempo requerido para completar la operación de torneado.

Aplicaciones de las herramientas

23.19. Especifique el grado C o grados (C1 a C8 en la tabla 23.5) de ANSI del carburo cementado para cada una de las situaciones siguientes: *a*) torneado del diámetro de una flecha de acero al alto carbono de 4.2 in a 3.5 in. *b*) fabricación de un pase final de fresado frontal utilizando una profundidad ligera de corte y un avance en una pieza de titanio. *c*) perforado

de los cilindros de una aleación de acero de un monoblock del motor de un automóvil antes del afilado y *d*) corte de las estrías a la entrada y a la salida de una válvula grande de latón.

23.20. Un cierto taller de maquinado utiliza cuatro grados de carburo cementado en sus operaciones. La composición química de estos grados son los siguientes: el grado 1 contiene 95% de WC y 5% de Co; el grado 2 contiene 82% de WC, 4% de Co y 14% de TiC; el grado 3 contiene 80% de WC, 10% de Co y 10% de TiC; y el grado 4 contiene 89% de WC y 11% de Co. *a*) ¿Qué grado se debe utilizar para el torneado final del acero no endurecido? *b*) ¿Qué grado deberá utilizarse para el fresado burdo del aluminio? *c*) ¿Qué grado deberá utilizarse para el torneado final del latón? *d*) ¿Cuál de los grados listados podría ser el adecuado para el maquinado de hierro colado? En cada caso, explique su recomendación.

23.21. Haga una lista del grupo ISO R513-1975(E) (la letra y el color están en la tabla 23.6) y diga si el número estaría hacia la parte más alta o más baja de los rangos para cada una de las situaciones siguientes: *a*) fresado de la superficie de una junta de la cabeza de un cilindro de aluminio de un automóvil (la cabeza del cilindro tiene un agujero en cada cilindro y debe ser totalmente plano y parejo para coincidir con el bloque), *b*) el torneado burdo de una flecha de acero endurecido, *c*) fresado de un compuesto polimérico de fibra reforzada que requiera un acabado muy preciso y *d*) el fresado de una forma burda en un cubo hecho de acero antes de ser endurecido.

23.22. Una operación de torneado se lleva a cabo en una flecha de acero con un diámetro de 5.0 in y una longitud de 32 in. Una ranura o camino se ha fresado a través de toda su longitud. La operación de torneado reduce el diámetro de la flecha. Para cada uno de los materiales para herramienta siguientes, indique si es un candidato idóneo para utilizarse en la operación: *a*) acero simple al carbono, *b*) acero a alta velocidad, *c*) carburo cementado, *d*) cerámico y *e*) diamante policristalino sinterizado. Para cada material que no sea un buen candidato, proporcione una razón por la cual no lo es.

Fluidos para corte

23.23. En una operación de fresado sin uso de refrigerante, se utiliza una velocidad de corte de 500 ft/min. Las condiciones de corte actuales (secas) proporcionan los parámetros de la ecuación de vida de herramienta de Taylor de $n = 0.25$ y $C =$ 1 300 (ft/min). Cuando se utiliza un refrigerante en la operación, la velocidad de corte puede aumentar 20% y aún así conservar la misma vida de herramienta. Suponiendo que n no varía con la adición de refrigerante, ¿cuál es el cambio que resulta en el valor de C?

23.24. En una operación de torneado que utiliza herramienta de acero de alta velocidad, la velocidad de corte es de 110 m/min. La ecuación de vida de herramienta de Taylor tiene como parámetros n de 0.140 y C de 150 (m/min) cuando la operación se hace en seco. Cuando se utiliza un refrigerante en la operación, el valor de C aumenta en 15%. Determine el aumento porcentual en la vida de herramienta que resulta si la velocidad de corte se mantiene a un valor de 110 m/min.

23.25. Una operación de producción de torneado en una pieza de trabajo de acero normalmente opera a una velocidad de corte de 125 ft/min utilizando herramientas de acero de alta velocidad sin ningún fluido de corte. Los valores de n y C en la ecuación de Taylor los proporciona la tabla 23.2 del libro. Se ha observado que el uso de un fluido de corte tipo refrigerante hará que aumente la velocidad en 25 ft/min sin que esto tenga algún efecto en la vida de la herramienta. Si se puede suponer que el efecto del fluido de corte es simplemente un aumento de la constante C en 25, ¿cuál sería el aumento en la vida de la herramienta si la velocidad de corte original de 125 ft/min se utilizara en esta operación?

23.26. Se está usando un barreno espiral de acero de alta velocidad de 6.0 mm en una operación de taladrado sobre acero blando. El operador aplica un aceite para corte por medio de una brocha que lubrica la broca antes de cada agujero. Las condiciones de corte son velocidad = 25 m/min, avance = 0.10 mm/rev y profundidad de agujero = 40 mm. El encargado menciona que la "velocidad y el avance están de acuerdo con el manual" para este material de trabajo. Sin embargo, dice: "la viruta se aglomera en las estrías ocasionando calor por fricción y la broca falla prematuramente debido al sobrecalentamiento". ¿Cuál es el problema? ¿Qué recomendaría usted para solucionarlo?

24

CONSIDERACIONES ECONÓMICAS Y PARA EL DISEÑO DEL PRODUCTO EN MAQUINADO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En este capítulo concluimos la cobertura de la tecnología tradicional de maquinado mediante el análisis de varios temas que aún no se abordan. El primer tema es la maquinabilidad, que se relaciona con las propiedades de los materiales de trabajo usados en el maquinado y cómo afectan estas propiedades al desempeño del maquinado. El segundo tema tiene que ver con las tolerancias y los acabados superficiales (capítulo 5) que pueden esperarse en los procesos de maquinado. En tercer lugar, se considera cómo seleccionar las condiciones de corte (velocidad, avance y profundidad de corte) en una operación de maquinado. Esta selección determina en gran medida el éxito económico de una operación dada. Por último, se proporcionan algunas directrices para los diseñadores de producto que deben tomarse en consideración al diseñar piezas que se producirán por medio de maquinado.

24.1 MAQUINABILIDAD

Las propiedades del material de trabajo tienen una influencia significativa sobre el éxito de la operación de maquinado. Estas propiedades y otras características del trabajo se resumen a menudo en el término “maquinabilidad”. Con ***maquinabilidad*** se denota la facilidad relativa con la que puede maquinarse un material (por lo general un metal) usando las herramientas y las condiciones de corte adecuadas.

Para evaluar la maquinabilidad se usan varios criterios; los más importantes son: 1) vida de la herramienta, 2) fuerzas y potencia, 3) acabado superficial y 4) facilidad de eliminación de la viruta. Aunque la maquinabilidad se refiere generalmente al material de trabajo, debe reconocerse que el buen desempeño del maquinado no depende sólo del material. El tipo de operación de maquinado, el trabajo de herramientas y las condiciones de corte son también factores importantes. Además, el criterio de maquinabilidad es una fuente de variación. Un material puede prolongar la vida de la herramienta mientras que otro puede proporcionar un mejor acabado superficial. Todos estos factores hacen difícil la evaluación de la maquinabilidad.

El ensayo de la maquinabilidad implica por lo general una comparación de materiales de trabajo. El desempeño en el maquinado de un material de prueba se mide en relación con el de un material base (estándar). Las medidas posibles de desempeño en la prueba de la maquinabilidad incluyen: 1) la vida de la herramienta, 2) el desgaste de la herramienta, 3) la fuerza de corte, 4) la potencia en la operación, 5) la temperatura de corte y 6) la velocidad de remoción del material bajo las condiciones estándar de la prueba. El desempeño relativo se expresa como un número índice, llamado índice de maquinabilidad (IM). Al material base que se usa como estándar se le da un índice de maquinabilidad de 1.00. A menudo se usa el acero B1112 como material base en comparaciones de maquinabilidad. Los materiales más fáciles de maquinar que la base tienen índices mayores a 1.00 y los materiales que son más difíciles de maquinar tienen índices menores de 1.00. Los índices de maquinabilidad se expresan con frecuencia como porcentajes en lugar de números índices. En el siguiente ejemplo se ilustra cómo puede determinarse un índice de maquinabilidad usando un ensayo de la vida de la herramienta como base de comparación.

EJEMPLO 24.1 Ensayo de maquinabilidad

Se realiza una serie de pruebas para la vida de una herramienta en dos materiales de trabajo bajo condiciones idénticas de corte, donde se varía solamente la velocidad en el procedimiento de ensayo. El primer material, definido como material base, proporciona una ecuación de Taylor para la vida de la herramienta, $vT^{0.28} = 350$ y el otro material (material de prueba) tiene la ecuación de Taylor: $vT^{0.27} = 440$, donde la velocidad está en m/minutos y la vida de la herramienta se da en minutos. Determine el índice de maquinabilidad del material de prueba usando la velocidad de corte que proporciona una vida de la herramienta de 60 minutos como base de comparación. Esta velocidad se denota por v_{60}.

Solución: El material base tiene un índice de maquinabilidad = 1.0. Su valor v_{60} puede determinarse por medio de la ecuación de la vida de la herramienta de Taylor como sigue:

$$v_{60} = (350/60^{0.28}) = 111 \text{ m/minuto}$$

La velocidad de corte de la vida de la herramienta de 60 minutos para el material de prueba se determina en forma similar:

$$v_{60} = (440/60^{0.27}) = 146 \text{ m/minuto}$$

Por consiguiente, el índice de maquinabilidad puede calcularse como

$$\text{IM (para el material de prueba)} = \frac{146}{111} = 1.31 \text{ (o 131\%)}$$

Muchos factores de materiales de trabajo afectan el desempeño del maquinado. Las propiedades mecánicas de un material de trabajo que afectan la maquinabilidad incluyen la dureza y la resistencia. Al incrementarse la dureza, aumenta el desgaste abrasivo en lo que la vida de la herramienta se reduce. La resistencia se indica por lo general como resistencia a la tensión, aun cuando el maquinado implica esfuerzos cortantes. Por supuesto, las resistencias a la cortante y a la tensión están correlacionadas. Al aumentar la resistencia del material, se incrementan las fuerzas de corte, la energía específica y la temperatura de corte, lo que hace que el material sea más difícil de maquinar. Por otro lado, una dureza muy baja puede ir en detrimento del desempeño del maquinado. Por ejemplo, el acero al bajo carbono, cuya dureza es relativamente baja, con frecuencia es demasiado dúctil para poder maquinarlo bien. La alta ductilidad causa desgarramientos del metal al formarse virutas y produce un deficiente acabado y problemas con la eliminación de las virutas. A menudo se usa el estirado en frío de las barras de bajo carbono para incrementar su dureza superficial y propiciar el rompimiento de las virutas durante el corte.

La composición química de un metal tiene un efecto importante sobre las propiedades, y en algunos casos afecta los mecanismos de desgaste que actúan sobre el material de la herramienta. La composición química afecta la maquinabilidad a través de estas relaciones. El contenido de carbono tiene un efecto significativo sobre las propiedades del acero. Al incrementarse el carbono, aumentan la resistencia y la dureza del acero: esto reduce el desempeño del maquinado. Muchos elementos de aleación que se añaden al acero para mejorar sus propiedades van en detrimento de la maquinabilidad. El cromo, el molibdeno y el tungsteno forman carburos en el acero, lo cual incrementa el desgaste de la herramienta y reduce la maquinabilidad. El manganeso y el níquel añaden resistencia y tenacidad al acero, los cuales reducen la maquinabilidad. Se puede añadir ciertos elementos al acero para mejorar su desempeño en el maquinado, como son plomo, azufre y fósforo. Estos aditivos tienen el efecto de disminuir el coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta, por lo tanto, reducen las fuerzas, la temperatura y la formación de acumulación en el filo. Estos efectos proporcionan una mejor vida de la herramienta y un mejor acabado superficial. Las aleaciones de acero formuladas para mejorar la maquinabilidad se conocen como ***aceros de maquinado libre***.

Existen relaciones similares para otros materiales de trabajo. La tabla 24.1 proporciona una lista de metales seleccionados junto con sus índices aproximados de maquinabilidad. Estos índices pretenden resumir el desempeño de los materiales en el maquinado.

TABLA 24.1 Valores aproximados del número de dureza Brinell e índices de maquinabilidad típicos para materiales de trabajo seleccionados.

Material de trabajo	Dureza Brinell	Índice de maquinabilidad[a]	Material de trabajo	Dureza Brinell	Índice de maquinabilidad[a]
Acero base: B1112	180-220	1.00	Acero de herramienta (no endurecido)	200-250	0.30
Acero al bajo carbono:	130-170	0.50	Hierro colado		
C1008, C1010, C1015			Suave	60	0.70
Acero al medio carbono:	140-210	0.65	Dureza media	200	0.55
C1020, C1025, C1030			Duro	230	0.40
Acero al alto carbono:	180-230	0.55	Superaleaciones		
C1040, C1045, C1050			Inconel	240-260	0.30
Aceros aleados[b]			Inconel X	350-370	0.15
1320, 1330, 3130, 3140	170-230	0.55	Waspalloy	250-280	0.12
4130	180-200	0.65	Titanio		
4140	190-210	0.55	Puro	160	0.30
4340	200-230	0.45	Aleaciones	220-280	0.20
4340 (fundición)	250-300	0.25	Aluminio		
6120, 6130, 6140	180-230	0.50	2-S, 11-S, 17-S	suave	5.00[c]
8620, 8630	190-200	0.60	Aleaciones de aluminio (suaves)	suave	2.00[d]
B1113	170-220	1.35	Aleaciones de aluminio (duras)	duro	1.25[d]
Aceros de libre maquinado	160-220	1.50	Cobre	suave	0.60
Acero inoxidable			Latón	suave	2.00[d]
301, 302	170-190	0.50	Bronce	suave	0.65[d]
304	160-170	0.40			
316, 317	190-200	0.35			
403	190-210	0.55			
416	190-210	0.90			

Los valores son promedios estimados basados en [1], [3], [4], [7] y otras fuentes. Los índices representan velocidades relativas de corte para una determinada vida de la herramienta (véase el ejemplo 24.1).

[a] Los índices de maquinabilidad se expresan con frecuencia en porcentaje (número índice × 100%).

[b] Esta lista de aceros aleados no es muy completa. Se ha tratado de incluir algunas de las aleaciones más comunes e indicar el rango de índices de maquinabilidad entre estos aceros.

[c] La maquinabilidad del aluminio varía ampliamente. Se expresa aquí como IM = 5.00, pero el rango probablemente va desde 3.00 hasta 10.00 o más.

[d] Las aleaciones de aluminio, los bronces y los latones varían también significativamente en el rendimiento del maquinado. Diferentes grados tienen diferentes índices de maquinabilidad. En cada caso, se ha tratado de reducir la variación a un solo valor promedio para indicar el desempeño relativo con otros materiales de trabajo.

24.2 TOLERANCIAS Y ACABADO SUPERFICIAL

Las operaciones de maquinado se usan para producir piezas con formas definidas para las tolerancias y los acabados superficiales que especifica el diseñador del producto. En esta sección se examinarán estos aspectos de las tolerancias y los acabados superficiales en maquinado. En la tabla 24.2 se enlistan las tolerancias típicas y los acabados superficiales que pueden obtenerse en las diferentes operaciones de maquinado.

24.2.1 Tolerancias en maquinado

En cualquier proceso de manufactura existe variabilidad y las tolerancias se usan para establecer límites permisibles de esa variación (sección 5.1.1). Cuando las tolerancias son restringidas, a menudo se selecciona el maquinado, puesto que las operaciones de maquinado proporcionan una alta precisión respecto a otros procesos de formado. En la tabla 24.2 se indican las tolerancias comunes que pueden lograrse con la mayoría de los procesos de maquinado examinados en el capítulo 22. Es necesario mencionar que los valores en esta tabla representan condiciones ideales, aunque son fácilmente alcanzables en una fábrica moderna. Si la máquina herramienta es antigua o está gastada, la variabilidad en los procesos será más grande que la ideal y será difícil mantener estas tolerancias. Por otro lado, las nuevas máquinas herramienta pueden lograr tolerancias más estrechas que las enlistadas.

En general, las tolerancias más estrechas significan costos más altos. Por ejemplo, si el diseñador de producto especifica una tolerancia de ±0.10 mm para el diámetro de un agujero de 6.0 mm, esta tolerancia podría lograrse por una operación de perforado, de acuerdo con la tabla 24.2. Sin embargo, si el diseñador especifica una tolerancia de ±0.025 mm, entonces se necesitaría una operación adicional de rimado para satisfacer la precisión en este requerimiento. La relación general entre tolerancia y costo de manufactura se describe en la figura 44.1.

Con lo anterior no se sugiere que las tolerancias más holgadas sean siempre buenas. Con frecuencia sucede que las tolerancias más estrechas y la variabilidad más baja en el maquinado de componentes individuales conducen a menos problemas de ensamblado, durante la prueba final del producto, el uso en campo y en la aceptación del cliente. Aunque estos costos no son siempre tan fáciles de cuantificar como los costos directos de manufactura, de cualquier forma pueden ser significativos. Las tolerancias más estrechas

TABLA 24.2 Valores de tolerancias típicas y rugosidades superficiales (promedio aritmético) que pueden lograrse en operaciones de maquinado

	Capacidad de tolerancia -Típica		Rugosidad superficial AA-Típica			Capacidad de tolerancia -Típica		Rugosidad superficial AA-Típica	
Operación de maquinado	mm	in	μm	μ-in	Operación de maquinado	mm	in	μm	μ-in
Torneado, barrenado			0.8	32	Rimado			0.4	16
Diámetro D < 25 mm	± 0.025	± 0.001			Diámetro D < 12 mm	± 0.025	± 0.001		
25 mm < D < 50 mm	± 0.05	± 0.002			12 mm < D < 25 mm	± 0.05	± 0.002		
Diámetro D > 50 mm	± 0.075	± 0.003			Diámetro D > 25 mm	± 0.075	± 0.003		
Perforado*			0.8	32	Fresado			0.4	16
Diámetro D < 2.5 mm	± 0.05	± 0.002			Periférico	± 0.025	± 0.001		
2.5 mm < D < 6 mm	± 0.075	± 0.003			De frente	± 0.025	± 0.001		
6 mm < D < 12 mm	± 0.10	± 0.004			Terminal	± 0.05	± 0.002		
12 mm < D < 25 mm	± 0.125	± 0.005			Perfilado, ranurado	± 0.025	± 0.001	1.6	63
Diámetro D > 25 mm	± 0.20	± 0.008			Cepillado	± 0.075	± 0.003	1.6	63
Escariado	± 0.025	± 0.001	0.2	8	Aserrado	± 0.50	± 0.02	6.0	250

*Las tolerancias típicas en perforado se expresan típicamente como tolerancias sesgadas bilaterales (por ejemplo +0.010/–0.002). Los valores en esta tabla se expresan como la tolerancia bilateral más cercana (por ejemplo, ±0.006).
Recopiladas de diferentes fuentes, las cuales incluyen [4], [6], [7], [8], [12] y [16]

que obligan al fabricante a lograr mejor control sobre sus procesos de manufactura pueden conducir a menores costos totales de operación para la compañía en el largo plazo.

24.2.2 Acabado superficial en maquinado

Con frecuencia, el maquinado es el proceso de manufactura que determina la geometría final y las dimensiones de la pieza, así como la textura de la superficie (sección 5.2.2). La tabla 24.2 enlista las rugosidades superficiales típicas que pueden alcanzarse en las operaciones de maquinado. Estos acabados deben alcanzarse con facilidad mediante las máquinas herramienta modernas en buenas condiciones de mantenimiento.

A continuación se analiza cómo determinar los acabados superficiales en una operación de maquinado. La rugosidad de una superficie maquinada depende de muchos factores que pueden agruparse de la siguiente manera: 1) factores geométricos, 2) factores de material de trabajo y 3) factores de vibración y de la máquina herramienta. Mediante el análisis del acabado superficial que se realiza en este capítulo, se estudian estos factores y sus efectos.

Factores geométricos Estos factores determinan la geometría de la superficie en una pieza maquinada. Éstos incluyen: 1) el tipo de operación de maquinado; 2) la geometría de la herramienta de corte, la más importante es el radio de la nariz; y 3) el avance. La característica de la superficie que resulta de estos factores es la rugosidad superficial "ideal" o "teórica" que se obtendría en ausencia de los factores del material de trabajo, de la vibración y de la máquina herramienta.

El tipo de operación se refiere al proceso de maquinado que se usa para generar la superficie. Por ejemplo, el fresado periférico, el fresado de frente y el perfilado, todos producen superficies planas; sin embargo, la geometría de la superficie es diferente para toda operación debido a las diferencias en la forma de la herramienta y en la manera en que la herramienta interactúa con la superficie. En la figura 5.4 puede obtenerse una idea de las diferencias, al observar diferentes orientaciones posibles de una superficie.

La geometría de la herramienta y el avance se combinan para formar la geometría de la superficie. En la geometría de la herramienta, el factor importante es la forma de la punta de la herramienta. Los efectos pueden verse para una herramienta de punta sencilla en la figura 24.1. Con el mismo avance, un mayor radio de nariz causa marcas de avance menos pronunciadas, lo que produce un mejor acabado. Si se comparan dos avances con el mismo radio de la nariz, el avance más grande aumenta la separación entre las marcas de avance y conduce a un incremento en el valor de la rugosidad superficial ideal. Si la velocidad de avance es lo suficientemente grande y el radio de la nariz es lo suficientemente pequeño, de manera que el filo de corte frontal participe en la creación de la nueva superficie, entonces el ángulo del filo de corte frontal (AFCF) afectará la geometría de la superficie. En este caso, un mayor AFCF producirá un valor de la rugosidad superficial más alto. En teoría, un AFCF igual a cero podría producir una superficie perfectamente suave; sin embargo, las imperfecciones de la herramienta, del material de trabajo y del proceso de maquinado impiden alcanzar un acabado ideal como éste.

Los efectos del radio de la nariz y del avance pueden combinarse en una ecuación para predecir la media aritmética ideal de la rugosidad de una superficie producida por una herramienta de punta sencilla. La ecuación se aplica a operaciones como las de torneado, perfilado y cepillado:

$$R_i = \frac{f^2}{32NR} \tag{24.1}$$

donde R_i = media aritmética teórica de la rugosidad superficial, mm (in); f = avance, mm (in) y NR = radio de la nariz en la punta de la herramienta, mm (in). La ecuación supone que el radio de la nariz no es cero y que el avance y el radio de la nariz serán los factores principales que determinen la geometría de la superficie. Los valores para R_i se dan en unidades de mm (in), los cuales pueden convertirse a μm (μ-in).

La ecuación (24.1) puede usarse para estimar la rugosidad superficial ideal en el fresado frontal con herramienta de insertos, donde f representa la carga de viruta (avance por

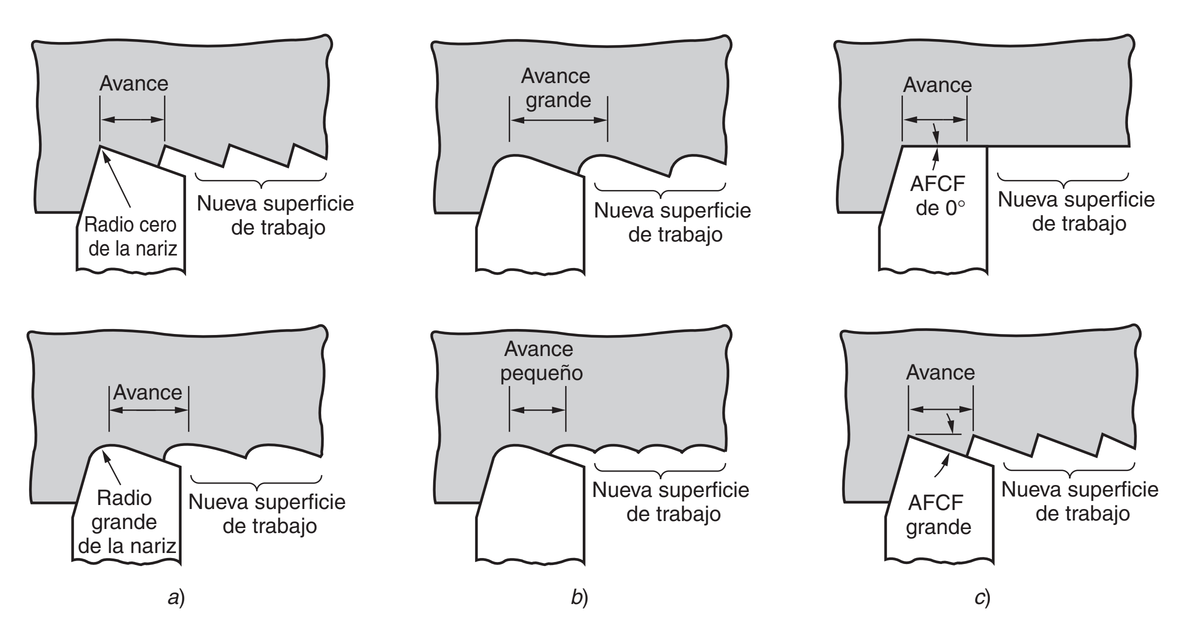


FIGURA 24.1 Efecto de los factores geométricos en la determinación del acabado teórico sobre una superficie de trabajo para herramientas de punta sencilla: *a*) efecto del radio de la nariz, *b*) efecto del avance y *c*) efecto del ángulo del filo de corte frontal (AFCF).

diente). Sin embargo, debe notarse que las puntas traseras y delanteras de los filos de rotación de la fresa producen marcas de avance sobre la superficie de trabajo, lo cual complica la geometría de la superficie.

En el fresado de placas, donde se utilizan los filos de corte recto de la fresa para generar la geometría superficial, puede usarse la siguiente relación para estimar el valor ideal de rugosidad superficial, con base en el análisis de Martellotti [13]:

$$R_i = \frac{0.125 f^2}{(D/2) \pm (fn_t/\pi)} \tag{24.2}$$

donde f = carga de viruta, mm/diente (in/diente); D = diámetro de la fresadora, mm (in); y n_t = número de dientes. El signo positivo en el denominador es para el fresado ascendente y el signo negativo es para el fresado descendente. En la ecuación (24.2), se supone que cada diente está igualmente espaciado alrededor del cortador, que todos los filos de corte son equidistantes al eje de rotación y que el árbol que soporta el cortador se conserva perfectamente recto durante la rotación (desviación cero). Estas suposiciones se dan muy pocas veces en la práctica. En consecuencia, los patrones ondulatorios se sobreponen frecuentemente en la superficie, donde las ondulaciones corresponden a la velocidad de rotación de corte.

Las relaciones anteriores para el acabado de la superficie ideal suponen una herramienta de corte afilada. Al desgastarse la herramienta, cambia la forma del corte y esto se refleja en la geometría de la superficie de trabajo. El efecto no se nota para desgastes ligeros. Sin embargo, cuando el desgaste de la herramienta se vuelve significativo, en especial el desgaste del radio de la nariz, la rugosidad de la superficie se deteriora en comparación con los valores ideales determinados por las ecuaciones anteriores.

Factores del material de trabajo En la mayoría de las operaciones de maquinado, no es posible alcanzar el acabado ideal de la superficie, debido a los factores que se relacionan con el material de trabajo y a su interacción con la herramienta. Los factores del material de trabajo que afectan el acabado son: 1) efectos de recrecimiento del filo (AEF), debido a que se forma una AEF que se desprende en algún momento, las partículas se depositan en la superficie de trabajo recién creada y ocasionan una textura rugosa parecida al del papel de lija; 2) daño a la superficie causado por la viruta enredada en el trabajo;

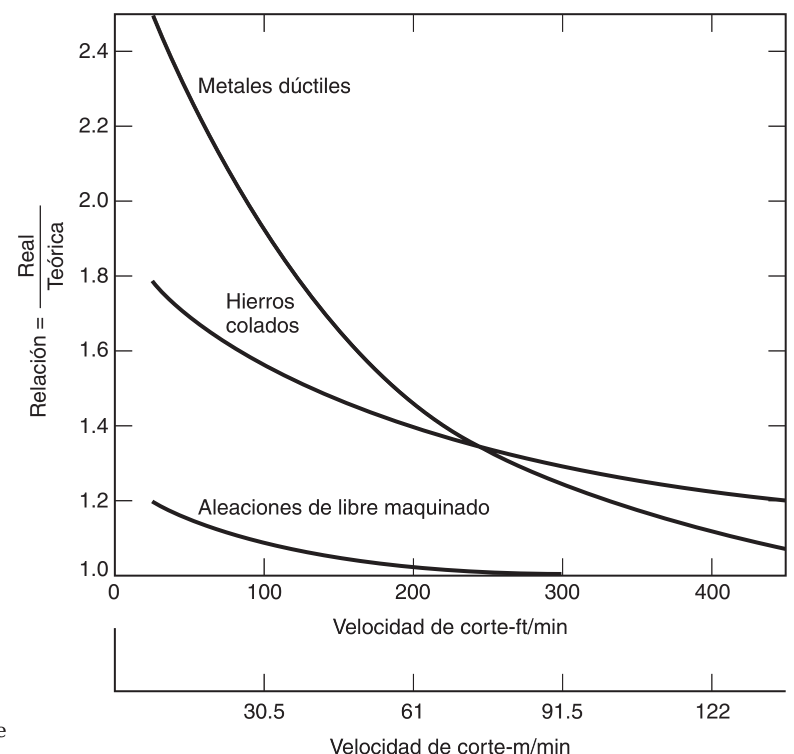


FIGURA 24.2 Relación entre la rugosidad superficial real y la rugosidad superficial ideal para varias clases de materiales. (Fuente: datos de General Electric Co. [15]).

3) desgarramiento de la superficie de trabajo durante la formación de viruta cuando se maquinan materiales dúctiles; 4) grietas en la superficie causadas por la formación discontinua de viruta cuando se maquinan materiales quebradizos y 5) fricción entre el flanco de la herramienta y la superficie de trabajo recién generada. Estos factores del material de trabajo son influidos por la velocidad de corte y el ángulo de inclinación, de manera que un aumento de la velocidad de corte o del ángulo de inclinación produce mejoras en el acabado superficial.

Los factores del material de trabajo son la causa de que el acabado real de la superficie sea en general más defectuoso que el ideal. Puede desarrollarse una relación empírica para convertir los valores de rugosidad ideal en un valor estimado de la rugosidad superficial real. Esta relación toma en cuenta la formación de AEF, el desgarre y otros factores. El valor de la relación depende de la velocidad de corte, así como el del material de trabajo. La figura 24.2 muestra la relación entre la rugosidad superficial real y la ideal como una función de la velocidad para varias clases de material de trabajo.

El procedimiento para predecir la rugosidad superficial real en una operación de maquinado es calcular el valor de la rugosidad superficial ideal y después multiplicar este valor por la relación entre la rugosidad real e ideal para la clase apropiada de material de trabajo. Esto puede resumirse como:

$$R_a = r_{ai}R_i \tag{24.3}$$

donde R_a = valor estimado de la rugosidad real; r_{ai} = relación del acabado superficial real e ideal de la figura 24.2 y R_i = valor real de la rugosidad de las ecuaciones previas (24.1) o (24.2).

EJEMPLO 24.2 Rugosidad superficial

Una operación de torneado se ejecuta sobre un acero C1008 (el cual es un material relativamente dúctil) usando una herramienta con un radio de nariz = 1.2 mm. Las condiciones de corte son velocidad = 100 m/min y avance = 0.25 mm/rev. Calcule un estimado de la rugosidad superficial para esta operación.

Solución: La rugosidad superficial ideal puede calcularse mediante la ecuación (24.1):

$$R_i = (0.25)^2/(32 \times 1.2) = 0.0016 \text{ mm} = 1.6 \text{ μm}$$

De la gráfica en la figura 24.2, la relación entre la rugosidad real a la ideal para metales dúctiles en 100 m/min es aproximadamente de 1.25. Por consiguiente, la rugosidad superficial real para la operación sería (aproximadamente):

$$R_a = 1.25 \times 1.6 = 2.0 \text{ μm}$$

■

Factores de vibración y de la máquina herramienta Estos factores se relacionan con la máquina herramienta, con las herramientas utilizadas y con la instalación de la operación. Incluyen el traqueteo o vibración de la máquina o de la herramienta de corte, la deflexión de los montajes que es una resultante frecuente de la vibración y el juego entre los mecanismos de avance, particularmente en máquinas herramienta antiguas. Si estos factores de la máquina herramienta pueden minimizarse o eliminarse, la rugosidad superficial en el maquinado será determinada primordialmente por los factores geométricos y los factores del material de trabajo descritos antes.

El traqueteo o vibración en la operación de una máquina puede producir ondulaciones pronunciadas en la superficie de trabajo. El operador puede distinguir un ruido característico cuando ocurre el traqueteo. Los pasos posibles para reducir o eliminar la vibración incluyen 1) añadir rigidez o amortiguación a la instalación, 2) operar a velocidades que no causen fuerzas cíclicas cuya frecuencia se aproxime a la frecuencia natural del sistema de la máquina herramienta, 3) reducir los avances y las profundidades para disminuir las fuerzas de corte y 4) cambiar el diseño del cortador para reducir fuerzas. La geometría de la pieza de trabajo también puede tener influencia en el traqueteo. Las secciones transversales delgadas tienden a incrementar la posibilidad de traqueteo; por lo tanto, requieren soportes adicionales para mitigar esta condición.

24.3 SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE CORTE

Un problema práctico en el maquinado es seleccionar las condiciones de corte apropiadas para una operación dada. Ésta es una de las tareas de planeación de procesos (sección 41.1). Para cada operación deben tomarse decisiones acerca de la máquina herramienta, de la(s) herramienta(s) de corte y de las condiciones de corte; estas decisiones deben considerar la maquinabilidad de la pieza de trabajo, la geometría de la pieza, el acabado superficial, etcétera.

24.3.1 Selección del avance y de la profundidad de corte

Las condiciones de corte en una operación de maquinado consisten en la velocidad, el avance, la profundidad de corte y el fluido para corte (si se usa o no, y qué tipo de fluido). El factor dominante en la elección sobre los fluidos para corte son generalmente las consideraciones sobre las herramientas (sección 23.4). La profundidad de corte se predetermina frecuentemente por la geometría de la pieza de trabajo y la secuencia de operación. Muchos trabajos requieren una serie de operaciones de desbaste seguidas de una operación final de acabado. En las operaciones de desbaste, la profundidad se hace tan grande como sea posible dentro de las limitaciones de la potencia disponible, la máquina herramienta, la rigidez de la instalación, la resistencia de la herramienta de corte y otros factores. En el corte de acabado, se fija la profundidad para alcanzar las dimensiones finales de la pieza.

El problema se reduce entonces a la selección del avance y de la velocidad. En general, los valores de estos parámetros deben decidirse en orden: ***primero el avance*** y ***segundo la velocidad***. La determinación de la velocidad de avance apropiada para una operación de maquinado depende de los siguientes factores:

- ***Herramienta.*** ¿Qué tipo de herramienta se usará? Los materiales más duros de herramienta (carburos cementados, cerámicos y similares) tienden a fracturarse con mayor facilidad que los aceros de alta velocidad. Estas herramientas se usan normalmente a velocidades de avance más lentas. Los aceros de alta velocidad pueden tolerar velocidades de avance más altas debido a su mayor tenacidad.
- ***Desbaste o acabado.*** Las operaciones de desbaste implican altos avances, típicamente de 0.05 a 1.25 mm/rev (0.020-0.050 in/rev) para torneado; las operaciones de acabado implican avances lentos, de manera típica, de 0.125 a 0.4 mm/rev (0.005-0.015 in/rev) para el torneado.
- ***Restricciones sobre el avance en desbaste.*** Si la operación es desbaste, ¿cuán alta puede fijarse la velocidad de avance? Para maximizar la velocidad de remoción de metal, el avance debe establecerse tan alto como sea posible. Los límites más altos en el avance son impuestos por las fuerzas de corte, la rigidez de la instalación y algunas veces por los caballos de fuerza.
- ***Requerimientos del acabado superficial.*** Si la operación es el acabado, ¿cuál es el acabado superficial que se desea? El avance es un factor importante en el acabado superficial y pueden usarse cálculos como los del ejemplo 24.2 para estimar el avance que producirá un acabado superficial deseado.

24.3.2 Optimización de la velocidad de corte

La selección de la velocidad de corte se basa en el mejor aprovechamiento de la herramienta de corte particular, lo cual significa normalmente escoger una velocidad que rinda una alta velocidad de remoción de material y que sea conveniente para una vida larga de la herramienta. Se han obtenido fórmulas matemáticas para determinar la velocidad óptima de corte para una operación de maquinado, siempre y cuando se conozcan los diferentes tiempos y componentes de costo de la operación. La derivación original de las ***ecuaciones económicas*** del maquinado se acredita a W. Gilbert [10]. Las fórmulas permiten calcular las velocidades óptimas de corte para alcanzar dos objetivos: 1) máxima velocidad de producción o 2) mínimo costo por unidad. Ambos objetivos buscan lograr un balance entre la velocidad de remoción de material y la vida de la herramienta. Las fórmulas se basan en el conocimiento de la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta usada en la operación. Por consiguiente, se han establecido el avance, la profundidad de corte y el material de trabajo. La derivación de la fórmula se ilustrará para una operación de torneado. Se puede desarrollar derivaciones similares para otros tipos de operaciones de maquinado [2].

Maximización de la velocidad de producción Para maximizar la velocidad de producción, se determina la velocidad que minimiza el tiempo de maquinado por unidad de producción. La minimización del tiempo de corte por unidad es equivalente a la maximización de la velocidad de producción. Este objetivo es importante en casos donde las órdenes de producción deben terminarse tan rápido como sea posible.

En el torneado existen tres etapas que contribuyen a la duración del ciclo de producción total para una pieza:

1. ***Tiempo de manejo de la pieza*** T_h**.** Es el tiempo que utiliza el operador para cargar la pieza en la máquina herramienta al principio del ciclo de producción y descargar la pieza después de completar el maquinado.
2. ***Tiempo de maquinado*** T_m**.** Es el tiempo real en que la herramienta desempeña el maquinado durante el ciclo.
3. ***Tiempo de cambio de la herramienta*** T_t**.** Al final de la vida de la herramienta, ésta debe cambiarse, lo cual toma tiempo. Este tiempo debe dividirse entre el número de piezas que se produjeron durante la vida de la herramienta. Sea n_p = número de piezas cortadas durante la vida de la herramienta (número de piezas que se cortan con un filo de corte hasta que la herramienta se cambia); entonces, el tiempo de cambio de la herramienta por pieza = T_t / n_p.

La suma de estos tres elementos de tiempo proporciona el tiempo total por unidad de producto para el ciclo de operación:

$$T_c = T_h + T_m + \frac{T_t}{n_p} \qquad (24.4)$$

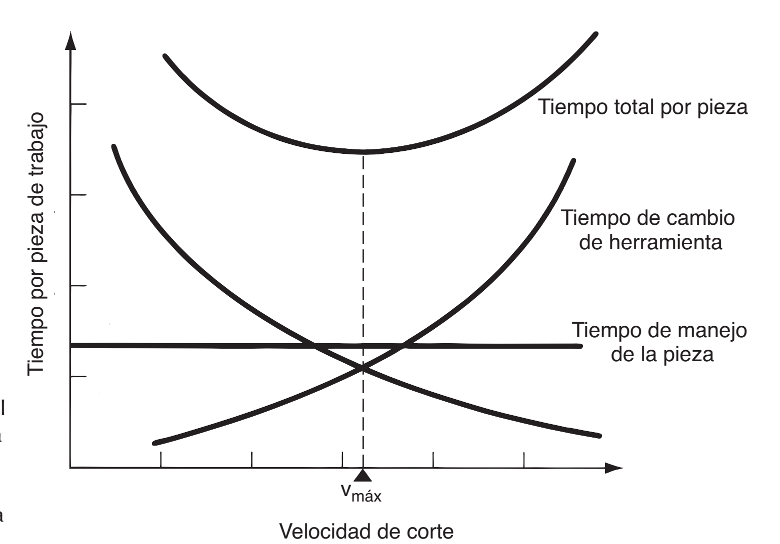


FIGURA 24.3 Elementos de tiempo en un ciclo de maquinado representados en función de la velocidad de corte. El tiempo total del ciclo por pieza se minimiza en un cierto valor de la velocidad de corte. Ésta es la velocidad para la máxima velocidad de producción.

donde T_c = tiempo del ciclo de producción por pieza, minutos; los otros términos se han definido con anterioridad.

El tiempo del ciclo T_c es una función de la velocidad de corte. Al incrementarse la velocidad de corte, T_m disminuye y T_t/n_p aumenta; T_h no se ve afectada por la velocidad. Estas relaciones se muestran en la figura 24.3.

El tiempo total por cada pieza se minimiza a un cierto valor de velocidad de corte. Esta velocidad óptima puede identificarse con una reordenación matemática de la ecuación (24.4) como una función de la velocidad. Puede demostrarse que el tiempo de maquinado en una operación de torneado recto está dado por:

$$T_m = \frac{\pi DL}{vf} \tag{24.5}$$

donde T_m = tiempo de maquinado, minutos; D = diámetro de la pieza de trabajo, mm (in); L = longitud de la pieza de trabajo, mm (in); f = avance, mm/rev (in/rev); y v = velocidad de corte mm/min para dar consistencia a las unidades (in/min para dar consistencia a las unidades).

El número de piezas por herramienta n_p también es una función de la velocidad. Puede demostrarse que:

$$n_p = \frac{T}{T_m} \tag{24.6}$$

donde T = vida de la herramienta, min/herr; y T_m = tiempo de maquinado por pieza, min/pieza. Tanto T como T_m son funciones de la velocidad; por lo tanto, la relación es una función de la velocidad:

$$n_p = \frac{fC^{1/n}}{\pi DLv^{1/n-1}} \tag{24.7}$$

El efecto de esta relación es que T_t/n_p en la ecuación (24.4) se incrementa al aumentar la velocidad de corte. Al sustituir las ecuaciones (24.5) y (24.7) en la ecuación (24.4) para T_c, se tiene

$$T_c = T_h + \frac{\pi DL}{fv} + \frac{T_t(\pi DLv^{1/n-1})}{fC^{1/n}} \tag{24.8}$$

La duración del ciclo por pieza es mínimo en la velocidad de corte para la cual la derivada de la ecuación (24.8) es igual a cero:

$$\frac{dT_c}{dv} = 0$$

Al resolver esta ecuación se obtiene la velocidad de corte para la máxima velocidad de producción en la operación:

$$v_{\text{máx}} = \frac{C}{\left[\left(\frac{1}{n} - 1\right)T_t\right]^n} \tag{24.9}$$

donde $v_{\text{máx}}$ se expresa en m/min (ft/min). La vida de la herramienta correspondiente a la máxima velocidad de producción es:

$$T_{\text{máx}} = \left(\frac{1}{n} - 1\right)T_t \tag{24.10}$$

Minimización del costo por unidad Para el mínimo costo por unidad se determina la velocidad que minimiza el costo de producción por unidad de producto para la operación. Cuando se derivan las ecuaciones para este caso, se inicia con los cuatro componentes de costo que determinan el costo total por unidad durante una operación de torneado:

1. ***Costo del tiempo de manejo de la pieza.*** Es el costo del tiempo que utiliza el operador cargando y descargando la pieza. Sea C_o = tasa de costo (por ejemplo, \$/min) para el operador y la máquina. Entonces el costo de tiempo de manejo de la pieza = C_oT_h.
2. ***Costo del tiempo de maquinado.*** Es el costo del tiempo que toma la herramienta para hacer el maquinado. Si se usa otra vez C_o para representar el costo por minuto del operador y de la máquina herramienta, el costo de tiempo de corte = C_oT_m.
3. ***Costo del tiempo de cambio de herramienta.*** Es el costo del tiempo de cambio de herramienta = C_oT_t/n_p.
4. ***Costo de la herramienta.*** Además del tiempo de cambio de la herramienta, ésta en sí tiene un costo que debe añadirse al costo total de operación. Este costo es relativo al filo de corte C_t, dividido entre el número de piezas maquinadas con ese filo de corte n_p. Entonces, el costo de la herramienta por unidad de producto está dado por C_t/n_p.

El costo de la herramienta requiere una explicación, puesto que es afectado por diferentes situaciones de la herramienta. Para insertos desechables (por ejemplo, insertos de carburo cementado), el costo de la herramienta se determina como

$$C_t = \frac{P_t}{n_e} \tag{24.11}$$

donde C_t = costo por filo cortante. \$/vida de la herramienta; P_t = precio del inserto, \$/inserto; y n_e = número de filos cortantes por inserto. Esto depende del tipo de inserto; por ejemplo, los insertos triangulares que pueden usarse sólo por un lado (inclinación positiva de la herramienta) rinden tres filos/inserto; si pueden usarse los dos lados del inserto (inclinación negativa de la herramienta) hay seis filos/inserto, y así sucesivamente.

Para herramientas que pueden reafilarse varias veces (por ejemplo, herramientas de acero de alta velocidad de vástago sólido o herramientas de carburo, soldado), el costo de la herramienta incluye el precio de compra más el costo de reafilado.

$$C_t = \frac{P_t}{n_g} + T_gC_g \tag{24.12}$$

donde C_t = costo por vida de la herramienta, \$/vida de la herramienta; P_t = precio de compra de la herramienta de vástago sólido o inserto soldado, \$/herramienta; n_g = número de vidas de la herramienta por herramienta, que es el número de veces que la herramienta puede reafilarse antes de que su desgaste sea tal que ya no pueda usarse (de 5 a 10 veces para herramientas de desbaste y de 10 a 20 veces para herramientas de acabado); T_g = tiempo para afilar o reafilar la herramienta, min/vida de la herramienta; y C_g = tasa de afilado, \$/min.

La suma de los cuatro componentes de costo proporciona el costo total por unidad de producto C_c para el ciclo de maquinado:

$$C_c = C_oT_h + C_oT_m + \frac{C_oT_t}{n_p} + \frac{C_t}{n_p} \tag{24.13}$$

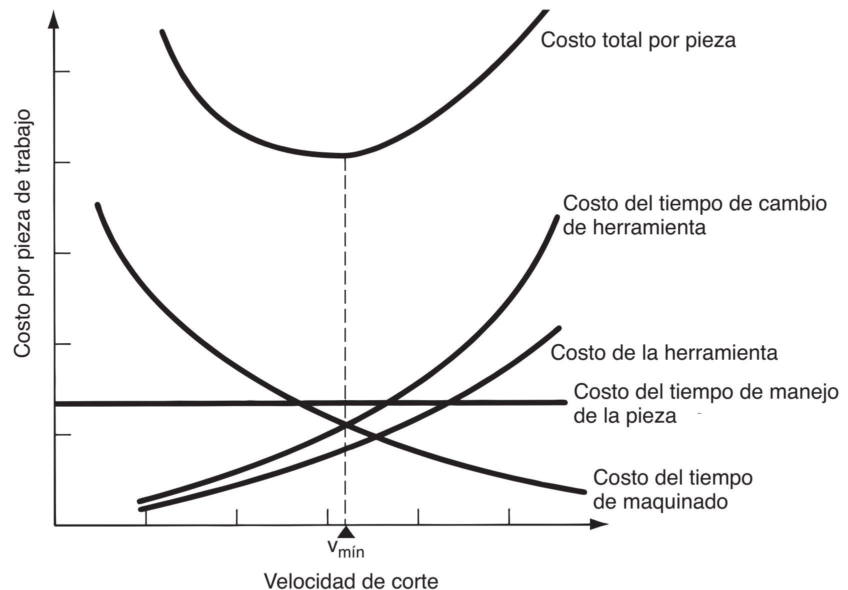


FIGURA 24.4 Componentes del costo en una operación de maquinado representados en función de la velocidad de corte. El costo total por pieza se minimiza en un cierto valor de la velocidad de corte. Ésta es la velocidad para el costo mínimo por pieza.

C_c es una función de la velocidad de corte, de igual manera que T_c es una función de v. Las relaciones para los términos individuales y el costo total como función de la velocidad de corte se muestran en la figura 24.4. La ecuación (24.13) puede rescribirse de manera distinta en términos de v y se obtiene:

$$C_c = C_o T_h + \frac{C_o \pi DL}{fv} + \frac{(C_o T_t + C_t)(\pi DLv^{1/n-1})}{fC^{1/n}} \tag{24.14}$$

La velocidad de corte que produce el mínimo costo por pieza para la operación puede determinarse si se toma la derivada de la ecuación (24.14) con respecto a v, se iguala a cero y se resuelve para $v_{mín}$:

$$v_{mín} = C\left(\frac{n}{1-n} \quad \frac{c_o}{c_o T_t + C_t} \right)^n \tag{24.15}$$

La vida de la herramienta correspondiente está dada por:

$$T_{mín} = \left(\frac{1}{n} - 1 \right)\left(\frac{C_o T_t + C_t}{C_o} \right) \tag{24.16}$$

EJEMPLO 24.3 Determinación de velocidades de corte en la economía del maquinado

Supóngase que una operación de torneado se desempeña con una herramienta de acero de alta velocidad sobre acero suave, con parámetros para la vida de la herramienta de Taylor n = 0.125, C = 70 m/min (tabla 23.2). La pieza de trabajo tiene una longitud = 500 mm y un diámetro = 100 mm. El avance = 0.25 mm/rev. El tiempo de manejo por pieza = 5.0 min y el tiempo de cambio de herramienta = 2.0 min. El costo de la máquina y del operador = \$30.00/h y el costo de la herramienta = \$3 por filo de corte. Encuentre: *a*) la velocidad de corte para la velocidad de producción máxima y *b*) la velocidad de corte para el costo mínimo.

Solución: *a*) La velocidad de corte para máxima velocidad de producción está dada por la ecuación (24.9):

$$T_{min} = 70\left(\frac{0.125}{0.875} \cdot \frac{1}{2} \right)^{0.125} = 50\,\text{m/min}$$

al convertir C_O = \$30/h a \$0.5/min, la velocidad de corte para el costo mínimo está dada por la ecuación 24.15.

$$v_{\text{máx}} = 70\left(\frac{0.125}{0.875} \cdot \frac{0.5}{0.5(2)+3.00}\right)^{0.125} = 42\text{m / min}$$

EJEMPLO 24.4 Velocidad de producción y costo en la economía del maquinado

Determine la velocidad de producción por hora y el costo por pieza para las dos velocidades de corte que se calcularon en el ejemplo 24.3. Se tienen los siguientes datos adicionales relativos al costo de la herramienta: precio del vástago de la herramienta de acero de alta velocidad = \$25.00, número de reafilados = 16, tiempo para reafilado = 7.0 minutos y costo hora de reafilado = \$30.00/h (\$0.50/min).

Solución: Primero se calcula el costo de herramienta, que se aplica a ambas velocidades de corte:

$$C_t = \frac{25.00}{16} + (7.0)(0.50) = \text{\$5.06/filo de corte}$$

a) Para la velocidad de corte que da la producción máxima, $v_{\text{máx}}$ = 50 m/min, se calcula el tiempo de maquinado por pieza y la vida de la herramienta.

$$\text{Tiempo de maquinado } T_m = \frac{\pi(0.5)(0.1)}{(0.25)(10^{-3})(50)} = 12.57 \text{ min/pieza}$$

$$\text{Vida de la herramienta } T = \left(\frac{70}{50}\right)^8 14.76 \text{ min/filo de corte}$$

A partir de esto se observa que el número de piezas por herramienta n_p = 14.76/12.57 = 1.17. Se utiliza n_p = 1. A partir de la ecuación (24.4), el tiempo del ciclo de producción promedio para la operación es

$$T_c = 5.0 + 12.57 + 2.0/1 = 19.57 \text{ min/pieza}$$

La velocidad de producción por hora correspondiente R_p = 60/19.57 = 3.1 piezas/hora. De la ecuación (24.13), el costo promedio por pieza para la operación es

$$C_c = 0.5(5.0) + 0.5(12.57) + 0.5(2.0)/1 + 5.06/1 = \text{\$14.85/pieza}$$

b) Para la velocidad de corte que da el costo de producción mínimo por pieza, $v_{\text{mín}}$ = 42 m/min, el tiempo de maquinado por pieza y la vida de la herramienta se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de maquinado } T_m = \frac{\pi(0.5)(0.1)}{(0.25)(10^{-3})(42)} = 14.96 \text{ min/pieza}$$

$$\text{Vida de la herramienta } T = \left(\frac{70}{42}\right)^8 = 59.54 \text{ min/filo de corte}$$

El número de piezas por herramienta n_p = 59.54/14.96 = 3.98. → Se usa n_p = 3 para evitar la falla durante la operación. El tiempo del ciclo de producción promedio para la operación es

$$T_c = 5.0 + 14.96 + 2.0/3 = 20.63 \text{ min/pieza}$$

La velocidad de producción por hora correspondiente R_p = 60/20.63 = 2.9 piezas/h. El costo promedio por pieza para la operación es

$$C_c = 0.5(5.0) + 0.5(14.96) + 0.5(2.0)/3 + 5.06/3 = \text{\$12.00/pieza}$$

Observe que la velocidad de producción es mayor para $v_{\text{máx}}$ y el costo por pieza es mínimo para $v_{\text{mín}}$.

Algunos comentarios sobre la economía del maquinado Pueden hacerse algunas observaciones prácticas relacionadas con las ecuaciones de la velocidad de corte óptimo. Primero, al aumentar los valores de C y n en la ecuación de la vida de la herramienta de Taylor, la velocidad óptima de corte aumenta según la ecuación (24.9) o (24.15). Las herramientas de carburos cementados o cerámicas deben usarse a velocidades que sean significativamente más altas que para las herramientas de acero de alta velocidad.

Segundo, al aumentar el tiempo o el costo de las herramientas (T_{tc} y C_t), las ecuaciones de la velocidad de corte producen valores más bajos. Las velocidades más bajas permiten una mayor durabilidad en las herramientas, y es un desperdicio cambiar las herramientas con demasiada frecuencia si el costo de las mismas o el tiempo para cambiarlas es alto. Un efecto importante del factor de costo es que los insertos desechables poseen generalmente una ventaja económica sustancial sobre las herramientas que pueden afilarse varias veces. Aunque el costo por inserto es significativo, el número de filos por inserto es lo suficientemente grande, y el tiempo requerido para cambiar el filo cortante es lo suficientemente bajo para que las herramientas desechables logren velocidades de producción más altas y costos por unidad de producto más bajos.

Tercero, $v_{máx}$ es siempre mayor que $v_{mín}$. El término C_t/n_p en la ecuación (24.13) tiene el efecto de empujar el valor de la velocidad óptima hacia la izquierda en la figura 24.4, lo que resulta en un valor más bajo que en la figura 24.3. En lugar de tomar el riesgo de cortar a una velocidad por encima de $v_{máx}$ o por debajo de $v_{mín}$, algunos talleres de maquinado se esfuerzan en operar en el intervalo entre $v_{mín}$ y $v_{máx}$, un intervalo algunas veces llamado "rango de alta eficiencia".

Los procedimientos esquematizados para seleccionar los avances y velocidades en maquinado son difíciles de aplicar en la práctica. Resulta difícil determinar la mejor velocidad de avance, porque las relaciones entre el avance y el acabado superficial, la fuerza, la potencia y otras restricciones no están fácilmente disponibles para cada máquina herramienta. Se requiere experiencia, juicio y experimentación para seleccionar el avance adecuado. La velocidad de corte óptima es difícil de calcular, porque para conocer los parámetros de la ecuación de Taylor C y n, por lo general es necesario realizar un ensayo previo. Las pruebas de este tipo en un ambiente de producción son costosas.

24.4 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL PRODUCTO EN MAQUINADO

Ya se han considerado varios aspectos del diseño de productos durante el estudio de la tolerancia y el acabado superficial (sección 24.2). En esta sección se presentarán algunos lineamientos de diseño para maquinado recopilados de las fuentes [1], [4] y [16]:

- En lo posible, las piezas deben diseñarse para que no necesiten maquinado. Si esto no es posible, entonces debe minimizarse la magnitud del maquinado requerido en las piezas. En general, se logra un menor costo de producción mediante el uso de procesos de forma final como la fundición de precisión, el forjado en matriz cerrada o el moldeado (de plásticos); o procesos de forma casi acabada como el forjado con matrices de recalcado. Las razones que hacen necesario el maquinado incluyen las tolerancias estrechas, el buen acabado superficial y las características geométricas especiales como roscas, agujeros de precisión, secciones cilíndricas con alto grado de redondez y formas similares que no pueden lograrse por otros medios diferentes al maquinado.
- Las tolerancias deben especificarse para satisfacer los requerimientos funcionales, pero también deben considerarse las capacidades de los procesos. Véase la tabla 24.2 para capacidades de las tolerancias en maquinado. Las tolerancias excesivamente restringidas aumentan el costo y puede ser que no añadan valor a la pieza. Al hacerse más estrechas las tolerancias (más pequeñas), los costos del producto se incrementan generalmente debido a procesamientos adicionales, equipamiento, inspección, retrabajo y desperdicio (véase la figura 42.1).
- Debe especificarse el acabado superficial para cumplir con requerimientos funcionales o estéticos, pero los mejores acabados incrementan generalmente los costos de procesamiento y requieren operaciones adicionales como esmerilado o bruñido.

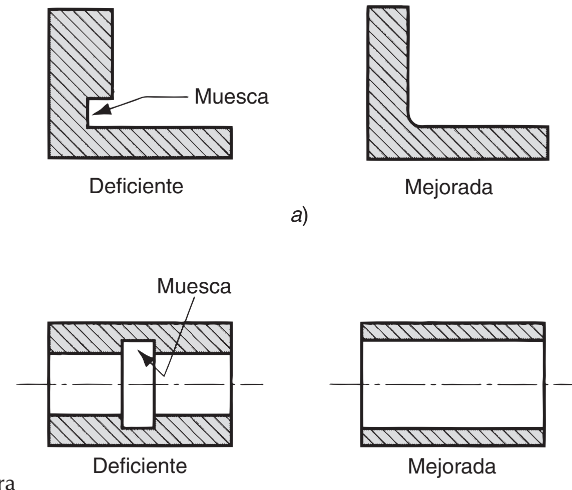


FIGURA 24.5
Dos piezas maquinadas con muescas: secciones transversales de *a*) una ménsula y *b*) una pieza giratoria. También se muestra cómo se mejora el diseño.

- Debe evitarse las formas maquinadas, como esquinas agudas, aristas y puntas, las cuales frecuentemente son difíciles de lograr por medio de maquinado. Las esquinas internas agudas requieren herramientas de corte puntiagudas que tienden a romperse durante el maquinado. Las esquinas y aristas agudas tienden a crear rebabas y son peligrosas al manejarse.
- Debe evitarse el barrenado de agujeros profundos. El barrenado de agujeros hondos requiere barras perforadoras largas. Las barras perforadoras deben ser rígidas y esto requiere frecuentemente el uso de materiales con alta rigidez, como carburos cementados, lo que resulta costoso.
- Las piezas maquinadas deben diseñarse de manera que se puedan producir a partir del material estándar disponible. Deben elegirse las dimensiones exteriores iguales o cercanas al tamaño estándar de los materiales para minimizar el maquinado; por ejemplo, piezas giratorias con diámetros exteriores iguales al diámetro estándar de las barras disponibles.
- Se deben diseñar las piezas que sean lo suficientemente rígidas para soportar las fuerzas de corte y de las mordazas de sujeción. Debe evitarse en lo posible el maquinado de piezas largas y delgadas, piezas planas grandes, piezas con paredes delgadas y formas similares.
- Debe evitarse las muescas, como las de la figura 24.5, porque frecuentemente requieren instalaciones adicionales, operaciones o herramientas especiales; también pueden conducir a las concentraciones de esfuerzos en el uso.
- Los diseñadores deben seleccionar materiales con buena maquinabilidad (sección 24.1). Como guía general, el índice de maquinabilidad de un material se correlaciona con la velocidad de corte y con la velocidad de producción disponibles. Por lo tanto, las piezas hechas con materiales de baja maquinabilidad son más costosas de producir. Las piezas que se endurecen por medio de tratamiento térmico deben acabarse mediante rectificado o esmerilado o maquinado, para lograr el tamaño y las tolerancias finales, generalmente con herramientas más costosas.

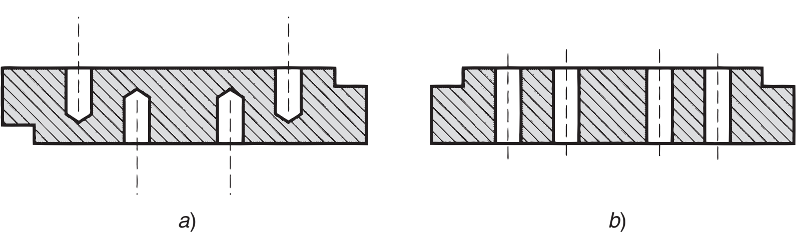


FIGURA 24.6 Dos piezas con formas similares de agujeros: *a*) agujeros que deben maquinarse desde los dos lados y requieren dos montajes y *b*) agujeros que pueden maquinarse desde un lado.

➢ Las piezas maquinadas deben diseñarse con formas que se puedan producir con un número mínimo de ajustes, si es posible con un solo ajuste. Por lo general, esto indica características geométricas que puedan formarse desde un solo lado de la pieza (véase la figura 24.6).

➢ Las piezas maquinadas deben diseñarse con formas que puedan lograrse con herramientas de corte estándar. Esto significa evitar tamaños inusuales de barrenos, roscas y características de formas extrañas que requieren herramientas con formas especiales. Además, resulta útil diseñar piezas que necesiten un número mínimo de cortes individuales en maquinado; esto permite frecuentemente completar la pieza en un solo ajuste de máquinas, como un centro de maquinado con capacidad limitada de almacenamiento de herramientas.

REFERENCIAS

[1] Bakerjian, R. (ed.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., vol VI, ***Design for Manufacturability.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1992.

[2] Boothroyd, G. y Knight, W. A., ***Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools***, 2a. ed. Marcel Dekker. Inc., Nueva York, 1989.

[3] Boston, O. W., ***Metal Processing***, 2a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1951.

[4] Bralla. J. G. (ed.), ***Design for Manufacturability Handbook***, 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[5] Brierley, R. G. y Siekman, H. J., ***Machining Principles and Cost Control***, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1964.

[6] DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R. A., ***Materials and Processes in Manufacturing***, 9a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.

[7] Drozda, T. J., y Wick, C. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol I. ***Machining.*** Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1983.

[8] Eary, D. F. y Johnson, G. E., ***Process Engineering: for Manufacturing***, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1962.

[9] Ewell, J. R., "Thermal Coefficients—A Proposed Machinability Index", ***Technical Paper MR67-200***, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1967.

[10] Gilbert, W. W., "Economics of Machining". ***Machining—Theory and Practice***, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1950. pp. 465-485.

[11] Groover, M. P., "A Survey on the Machinability of Metals". ***Technical Paper MR76-269***, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1976.

[12] ***Machining Data Handbook***, 3a. ed., vols. I y II. Metcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio, 1980.

[13] Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process". ***ASME Transactions***, vol. 63, noviembre de 1941, pp. 677-700.

[14] Schaffer, G. H., "The Many Faces of Surface Texture". Special Report 801. ***American Machinist & Automated Manufacturing***. Junio de 1988, pp. 61-68.

[15] ***Surface Finish***, Machining Development Service. Publicación A-5, General Electric Company, Schenectady, Nueva York (sin fecha).

[16] Trucks. H. E. y Lewis. G., ***Designing for Economical Production***, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1987.

[17] Van Voast, J., ***United States Air Force Machinability Report***, vol. 3, Curtiss-Wright Corporation, 1954.

PREGUNTAS DE REPASO

24.1 Defina maquinabilidad.

24.2 ¿Cuáles son los criterios por los que se valora comúnmente la maquinabilidad en operaciones de maquinado de producción?

24.3 Mencione algunas de las propiedades físicas o mecánicas importantes que afectan la maquinabilidad de un material de trabajo.

24.4 ¿Por qué los costos tienden a incrementarse cuando se requiere un mejor acabado superficial sobre una pieza maquinada?

24.5 ¿Cuáles son los factores básicos que afectan el acabado superficial en el maquinado?

24.6 ¿Cuáles son los parámetros que tienen mayor influencia en la determinación de la rugosidad ideal de superficie R_i en una operación de torneado?

24.7 Mencione algunos de los pasos que pueden tomarse para reducir o eliminar vibraciones en maquinado.

24.8 ¿Cuáles son los factores en que debe basarse la selección del avance en una operación de maquinado?

24.9 El costo unitario en una operación de maquinado es la suma de cuatro términos de costo. Los primeros tres términos son: 1) costo de cargar y descargar la pieza, 2) costo del tiempo en que la herramienta corta realmente el trabajo y 3) el costo de tiempo para cambiar la herramienta. ¿Cuál es el cuarto término?

24.10 ¿Cuál velocidad de corte es siempre menor para una operación de maquinado, dada la velocidad de corte para el costo mínimo o la velocidad de corte para la máxima velocidad de producción? ¿Por qué?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 14 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea la calificación se reduce un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

24.1. ¿Cuáles de los siguientes criterios se reconocen en forma general como indicativos de buena maquinabilidad (las cuatro mejores respuestas)?: *a*) facilidad en la eliminación de la viruta, *b*) temperaturas de corte altas, *c*) requerimientos de potencia altos, *d*) valor alto de R_a, *e*) vida larga de la herramienta, *f*) fuerzas de corte bajas y *g*) ángulo del plano de corte igual a cero.

24.2. De los diferentes métodos para probar la maquinabilidad. ¿cuál de los siguientes es el más importante? *a*) fuerzas de corte, *b*) temperatura de corte, *c*) potencia consumida en la operación, *d*) rugosidad superficial, *e*) vida de la herramienta, o *f*) desgaste de la herramienta.

24.3. ¿Un índice de maquinabilidad mayor que 1.0 indica que el material de trabajo *a*) es más fácil de maquinar que el metal base o *b*) más difícil de maquinar que el metal base, donde el metal base tiene un índice = 1.0?

24.4. En general, ¿cuál de los siguientes materiales tiene la maquinabilidad más alta?: *a*) aluminio, *b*) hierro fundido, *c*) cobre, *d*) acero al bajo carbono, *e*) acero inoxidable, *f*) aleaciones de titanio o g) acero de herramienta no endurecido.

24.5. En general, ¿con cuál de las siguientes operaciones puede lograrse las tolerancias más estrechas?: *a*) embrocado, *b*) perforado, *c*) fresado final, *d*) cepillado, *e*) aserrado.

24.6. Si se aumenta la velocidad de corte al maquinar un material de trabajo dúctil, ¿cuál será generalmente el efecto en el acabado superficial?: *a*) degradar el acabado superficial, lo que significa un alto valor de R_a o *b*) mejorar el acabado superficial, lo que implica un valor bajo de R_a.

24.7. En general, ¿con cuál de las siguientes operaciones puede lograrse los mejores acabados superficiales (el valor más bajo de R_a)?: *a*) embrocado, *b*) perforado, *c*) fresado final, *d*) cepillado, *e*) torneado.

24.8. ¿Cuál de los siguientes componentes de tiempo en el ciclo de maquinado se ve afectado por la velocidad de corte? (dos respuestas correctas): *a*) tiempo de carga y descarga de la pieza, *b*) tiempo de montaje de la máquina herramienta, *c*) tiempo en que la herramienta comienza a cortar y *d*) tiempo promedio de cambio de la herramienta por pieza.

24.9. ¿Cuál velocidad de corte es siempre menor para una operación de maquinado dada?: *a*) la velocidad de corte para la máxima velocidad de producción o *b*) la velocidad de corte para el costo mínimo.

24.10 ¿Un costo de herramienta o un tiempo de cambio de herramienta altos tenderán a *a*) disminuir, *b*) no tener ningún efecto o *c*) aumentar la velocidad de corte para el costo mínimo?

PROBLEMAS

Maquinabilidad

24.1. Se necesita determinar el índice de maquinabilidad para un nuevo material de trabajo usando la velocidad de corte para una vida de la herramienta de 60 min como base de comparación. Del ensayo para el material base (acero B1112), resultaron los siguientes valores de los parámetros de la ecuación de Taylor: $n = 0.29$ y $C = 500$, donde la velocidad está en m/min y la vida de la herramienta es min. Para el nuevo material, los valores de los parámetros fueron $n = 0.21$ y $C = 400$. Estos resultados se obtuvieron usando herramientas de carburo cementado. *a*) Calcule el índice de maquinabilidad para el nuevo material. *b*) Suponga que el criterio de maquinabilidad fue la velocidad de corte para una vida de la herramienta de 10 minutos, en lugar del criterio presente. Calcule el índice de maquinabilidad para este caso. *c*) ¿Qué demuestran los resultados de los dos cálculos acerca de las dificultades en la medición de la maquinabilidad?

24.2. Una pequeña compañía usa una sierra de banda para cortar por completo una barra de metal de 2 in. Un alimentador de piezas introduce un nuevo material que se supone debe ser más maquinable y que proporciona propiedades mecánicas semejantes. La compañía no tiene acceso a dispositivos de medición sofisticados, pero sí cuenta con un cronómetro.

Se adquirió una muestra del nuevo material y se cortó tanto el material actual como el nuevo con las mismas especificaciones para la sierra de banda. En el proceso, se midió cuánto tiempo fue necesario para cortar cada uno de los materiales. Para cortar el material actual se ocupó un promedio de 2 minutos 20 segundos. Para cortar por completo el material nuevo, se utilizó un promedio de 2 minutos 6 segundos. *a*) Desarrolle un sistema de índices de maquinabilidad basado en el tiempo necesario para cortar por completo la barra de 2.0 in, usando el material actual como material base. *b*) Utilice dicho sistema para determinar el índice de maquinabilidad para el material nuevo.

24.3 Se necesita determinar el índice de maquinabilidad para un nuevo material de trabajo. Con el material base (B1112), los datos del ensayo resultaron en una ecuación de Taylor con parámetros $n = 0.29$ y $C = 490$. Para el material nuevo, los parámetros de Taylor fueron $n = 0.23$ y $C = 430$. Las unidades en ambos casos corresponden a: velocidad en m/min y vida de la herramienta en minutos. Estos resultados se obtuvieron usando herramientas de carburo cementado. *a*) Calcule un índice de maquinabilidad para el material nuevo utilizando la velocidad de corte para una vida de la herramienta de 30 minutos como base de comparación. *b*) Si el criterio de maquinabilidad fuera la vida de la herramienta para una velocidad de corte de 150 m/min. ¿Cuál es el índice de maquinabilidad para el material nuevo?

24.4 Se han realizado ensayos para determinar la vida de la herramienta en el torneado sobre acero B1112 con herramientas de acero de alta velocidad, y los parámetros resultantes de la ecuación de Taylor son $n = 0.13$ y $C = 225$. El metal base es acero B1112 el cual tiene un índice de maquinabilidad = 1.00 (100%). El avance y la profundidad durante estos ensayos fueron avance = 0.010 in/rev y profundidad de corte = 0.100 in. Con base en esta información y los datos de maquinabilidad proporcionados en la tabla 24.1, determine la velocidad de corte que recomendaría usted para los siguientes materiales de trabajo, si la vida deseada para la herramienta en operación es de 30 minutos (suponga que se utiliza el mismo avance y profundidad de corte): *a*) acero al bajo carbono C1008 con dureza Brinell = 150, *b*) aleación de acero 4130 con dureza Brinell = 190, *c*) acero B1113 con dureza Brinell = 170.

Rugosidad superficial

24.5. En una operación de torneado sobre hierro fundido se utiliza una herramienta de corte con un radio de nariz = 1.5 mm, avance = 0.22 mm/rev y una velocidad = 1.8 m/s. Realice una estimación de la rugosidad superficial para este corte.

24.6. En una operación de torneado se utiliza una herramienta de corte con un radio de nariz de 2/64 in sobre un acero de maquinado libre con una velocidad de avance = 0.010 in/rev y una velocidad de corte = 300 ft/min. Determine la rugosidad superficial para este corte.

24.7. Se usa una herramienta de punta sencilla de acero de alta velocidad con radio de nariz = 3/64 in en una operación de perfilado de una pieza de acero dúctil. La velocidad de corte = 120 ft/min. El avance = 0.014 in/paso y la profundidad de corte es de 0.135 in. Determine la rugosidad superficial para esta operación.

24.8 Una pieza que se tornea en un torno mecánico debe tener un acabado superficial de 1.6μm. La pieza está hecha de aleación de aluminio de maquinado libre. La velocidad de corte = 150 m/min y la profundidad de corte = 4.0 mm. El radio de nariz de la herramienta = 0.75 mm. Determine el avance con el que se puede lograr el acabado superficial especificado.

24.9 Resuelva el problema 24.8, considerando que la pieza está hecha de hierro colado en lugar de aluminio y la velocidad de corte se reduce a 100 m/min.

24.10 Una pieza que se tornea en un torno mecánico debe tener un acabado superficial de 1.5 μm. La pieza está hecha de aluminio. La velocidad de corte es 1.5 m/s y la profundidad es de 3.0 mm. El radio de la nariz de la herramienta = 1.00 mm. Determine el avance con el que se logra el acabado superficial especificado.

24.11 La especificación del acabado superficial en un trabajo de torneado es de 0.8 μm. El material de trabajo es hierro colado. Las condiciones de corte se han establecido como: $v = 75$ m/min, $f = 0.3$ mm/rev y $d = 4.0$ mm. Es necesario seleccionar el radio de nariz de la herramienta de corte. Determine el radio de nariz mínimo con el que podría lograrse el acabado especificado en esta operación.

24.12 Se realiza una operación de fresado frontal en una pieza de hierro fundido para lograr un acabado superficial de 36 μ-in. El cortador usa cuatro insertos y tiene 3.0 in de diámetro. El cortador gira a 475 rev/min. Para obtener el mejor acabado posible se usan insertos de carburo con un radio de nariz = 4/64 in. Determine la velocidad de avance requerida (in/min) para lograr el acabado de 32 μ-in.

24.13 Una operación de fresado frontal no está rindiendo el acabado superficial requerido sobre el trabajo. El cortador tiene cuatro dientes tipo inserto para fresado frontal. El supervisor del taller de maquinado cree que el problema consiste en que el material es demasiado dúctil para el trabajo, pero según los ensayos este parámetro está dentro del rango de ductilidad del material especificado por el diseñador. Sin conocer más acerca del trabajo, ¿cuáles cambios sugeriría usted *a*) en las condiciones de corte y *b*) en las herramientas, para mejorar el acabado superficial?

24.14 Se ejecuta una operación de torneado sobre acero C1010, el cual es un grado dúctil. Se desea un acabado superficial de 64 μ-in (AA), y al mismo tiempo maximizar la velocidad de remoción del metal. Se ha decidido que la velocidad debe estar en una escala de 200 a 400 ft/min y que la velocidad de corte sea de 0.080 in. El radio de la nariz de la herramienta = 3/64 in. Determine la combinación de velocidad y avance que satisface estos criterios.

24.15 Se realiza fresado plano para acabar una pieza de hierro colado antes de pintarla. El cortador de la fresadora tiene un diámetro de 80 mm y cuatro dientes igualmente espaciados. La carga de virutas se establece en 0.40 mm/diente, y la velocidad de corte es de 1.0 m/s. Estime la rugosidad superficial para *a*) el fresado ascendente y *b*) el fresado descendente.

24.16 Se ejecuta una operación de fresado periférico usando una fresa para placa con 4 dientes y un diámetro de 2.50 in. El avance = 0.015 in/diente y la velocidad de corte = 150 ft/min. Suponga primero que los dientes están igualmente espaciados alrededor del cortador y que cada diente proyecta una distancia igual desde el eje de rotación, determine la rugosidad superficial teórica para *a*) el fresado ascendente y *b*) el fresado descendente.

Economía del maquinado

24.17 Se usa una herramienta de acero de alta velocidad para tornear una pieza de acero de 300 mm de largo y 80 mm de diámetro. Los parámetros en la ecuación de Taylor son n = 0.13 y C = 75 (m/min) para un avance de 0.4 mm/rev. El costo del operador y la máquina herramienta = $30.00/h y el costo de la herramienta por filo de corte = $4.00. Se requieren 2.0 min para cargar y descargar la pieza de trabajo y 3.50 min para cambiar las herramientas. Determine *a*) la velocidad de corte para una velocidad de producción máxima, *b*) la vida de la herramienta en minutos de corte y *c*) la duración del ciclo y el costo por unidad de producto.

24.18 Resuelva el problema 24.17, pero en el inciso *a*) determine la velocidad de corte para el costo mínimo.

24.19 Una herramienta de carburo cementado se usa para tornear una pieza que tiene 14.0 in de largo y 4.0 in de diámetro. Los parámetros en la ecuación de Taylor son n = 0.25 y C = 1 000 (ft/min). La tasa para el operador y la máquina herramienta = $45.00/h y el costo de la herramienta por filo de corte = $2.50. Se requiere 2.5 min para cargar y descargar la pieza de trabajo y 1.50 min para cambiar la herramienta. El avance = 0.015 in/rev. Determine *a*) la velocidad de corte para la máxima velocidad de producción, *b*) la vida de la herramienta en minutos de corte y *c*) la duración del ciclo y el costo por unidad de producto.

24.20 Resuelva el problema 24.19, pero en el inciso *a*) determine la velocidad de corte para el costo mínimo.

24.21 En este problema se comparan las herramientas desechables y reafilables. En cierto taller de maquinado, se cuenta con el mismo grado de herramientas de carburo en dos formas distintas para operaciones de torneado: insertos desechables e insertos soldados. Los parámetros en la ecuación de Taylor para este grado son n = 0.25 y C = 300 (m/min) bajo las condiciones de corte consideradas aquí. El precio de cada inserto desechable = $6.00, cada inserto tiene 4 filos de cortes y el tiempo para cambiar la herramienta = 1.0 min (éste es un promedio del tiempo para recorrer el inserto y el tiempo para reemplazarlo cuando se han usado todos los filos). El precio de la herramienta con insertos soldados = $30.00 y se estima que puede usarse un total de 15 veces antes de desecharla. El tiempo de cambio de herramienta para la herramienta reafilable = 3.0 min. El tiempo estándar para afilar o reafilar el filo de corte es de 5.0 min y el afilado se paga a una tasa = $20.00/hr. El tiempo de maquinado en el torno cuesta $24.00/h. La pieza de trabajo a usar en la comparación tiene 375 mm de largo y 62.5 mm de diámetro, y se requieren 2.0 minutos para cargar y descargar el trabajo. El avance = 0.30 mm/rev. Para los dos casos, compare *a*) las velocidades de corte para el costo mínimo, *b*) las vidas de las herramientas, *c*) la duración del ciclo y el costo por unidad de producción. ¿Qué herramienta recomendaría usted?

24.22 Resuelva el problema 24.21 pero en el inciso *a*), determine las velocidades de corte para la máxima velocidad de producción.

24. 23 Se comparan tres materiales de herramienta para realizar la misma operación de torneado para acabado en un lote de 150 piezas de acero: acero de alta velocidad, carburo cementado y cerámica. Para el acero de alta velocidad, los parámetros de la ecuación de Taylor son n = 0.130 y C = 80 (m/min). El precio de la herramienta de acero de alta velocidad es de $20.00 y se estima que puede afilarse y reafilarse 15 veces a un costo de $2.00 por afilado. El tiempo de cambio de la herramienta es de 3 min. Tanto las herramientas de carburo como las cerámicas son en forma de insertos y pueden fijarse en el mismo portaherramientas mecánico. Los parámetros de la ecuación de Taylor para el carburo cementado son n = 0.3 y C = 650 (m/min), y para la cerámica n = 0.6 y C = 3500 (m/min). El costo por inserto para el carburo es de $8.00 y para la cerámica de $10.00. En ambos casos, el número de cortes de filos cortantes por inserto es de seis. El tiempo de cambio de la herramienta es de 1.0 min para los dos tipos de herramientas. El tiempo de cambio de las piezas de trabajo es de 2.5 min. El avance es de 0.30 mm/rev y la profundidad de corte es de 3.5 mm. El costo del tiempo de maquinado es de $40/h. Las dimensiones de la pieza son 73.0 mm de diámetro y 250 mm de longitud. El tiempo de montaje para el lote es de 2.0 h. Para los tres tipos de herramienta, compare *a*) las velocidades de corte para el costo mínimo, *b*) las vidas de las herramientas, *c*) la duración del ciclo, *d*) el costo por unidad de producción, *e*) el tiempo total para completar el lote y la velocidad de producción, *f*) ¿cuál es la proporción de tiempo que se requiere en realidad para cortar el metal con cada herramienta?

24.24. Resuelva el problema 24.23, pero en los incisos *a*) y *b*), determine las velocidades de corte y las vidas de las herramientas para la máxima velocidad de producción.

24.25. Se usa una máquina de fresado vertical para perforar el diámetro interno de un lote grande de piezas tubulares. El diámetro = 28.0 in y la longitud de la perforación = 14.0 in. Las condiciones de corte actuales son: velocidad = 200 ft/min, avance = 0.015 in/rev y profundidad = 0.125 in. Los parámetros de la ecuación de Taylor para la herramienta de corte en esta operación son n = 0.23 y C = 850 (ft/min). El tiempo de cambio de la herramienta = 3.0 min y el costo de la herramienta = $3.50 por filo de corte. El tiempo requerido para cargar y descargar las piezas = 12.0 min y el costo del tiempo de maquinado en esta operación de perforado = $42.00/h. La administración ha indicado que la tasa de producción para este trabajo debe incrementarse en 25%. ¿Es esto posible? Suponga que el avance debe permanecer sin cambio a fin de lograr el acabado superficial requerido. ¿Cuál es la velocidad actual de producción y la máxima velocidad posible para este trabajo?

24.26. Un torno de CN hace dos pasos de corte a través de una pieza cilíndrica de trabajo en un ciclo automático. El ope-

rador carga y descarga la máquina. El diámetro inicial del trabajo es de 3.00 in y su longitud = 10 in. El ciclo de trabajo consiste en los siguientes pasos (con elementos de tiempo dados entre paréntesis cuando esto es aplicable): 1. El operador carga la pieza en la máquina, empieza el ciclo (1.00 min); 2. El torno de CN coloca las herramientas en posición para el primer paso (0.10 min); 3. El torno de CN maquina el primer paso (el tiempo depende de la velocidad de corte); 4. El torno de CN reposiciona la herramienta para el segundo paso (0.4 min);5. El torno de CN maquina el segundo paso (el tiempo depende de la velocidad de corte); 6. El operador descarga la pieza y la coloca en la charola (1.00 min). Además, la herramienta de corte debe cambiarse en forma periódica y este cambio de herramienta toma 1.00 min. La velocidad de avance = 0.007 in/rev y la profundidad de corte para cada paso = 0.100 in. El costo del operador y de la máquina = $39/h y el costo de la herramienta = $2/filo de corte. La ecuación de Taylor aplicable para la vida de la herramienta tiene los parámetros $n = 0.26$ y $C = 900$ (ft/min). Determine *a*) la velocidad de corte para el costo mínimo por pieza, *b*) el tiempo promedio requerido para completar un ciclo de producción, *c*) el costo del ciclo de producción. Si el tiempo total de montaje para este trabajo es de 3.0 h y el tamaño del lote es de 300 piezas, ¿cuánto tiempo se requerirá para completar el lote?

24.27. Como se indicó en la sección 24.4, el efecto de un fluido para corte es aumentar el valor de C en la ecuación de vida de la herramienta de Taylor. En cierta situación de maquinado, donde se utilizaban herramientas de acero de alta velocidad, el valor de C se incrementó de 200 a 225 debido al uso de un fluido para corte. El valor de n es el mismo con o sin fluido en $n = 0.125$. La velocidad de corte usada en la operación fue $v = 125$ ft/min. Avance = 0.010 in/rev y profundidad = 0.100 in. El efecto del fluido para corte puede ser incrementar la velocidad de corte (con la misma vida de la herramienta) o aumentar la vida de la herramienta (a la misma velocidad de corte). *a*) ¿Cuál es la velocidad de corte que resultaría del uso del fluido de corte si la vida de la herramienta permanece igual que sin usar dicho fluido? *b*) ¿Cuál es la vida de la herramienta que resultaría si la velocidad de corte es de 125 ft/min? *c*) Económicamente, ¿cuál efecto es el mejor?, considere que el costo de la herramienta = $2.00 por filo de corte, el tiempo de cambio de la herramienta = 2.5 min y el costo del operador y de la máquina = $30/h. Justifique su respuesta con cálculos, usando el costo por pulgada cúbica de metal maquinado como un criterio de comparación. No tome en cuenta los efectos del tiempo de manejo de la pieza de trabajo.

24.28 En una operación de torneado sobre acero dúctil se desea obtener una rugosidad superficial real de 63 μ-in usando una herramienta con radio de nariz de 2/64 in. La rugosidad ideal está dada por la ecuación (24.1) y tendrá que hacerse un ajuste usando la figura 24.2 para convertir la rugosidad real de 63 μ-in a una rugosidad ideal; debe tomarse en cuenta el material y la velocidad de corte. Se utilizan insertos desechables a un costo de $1.75 por filo de corte (cada inserto cuesta $7.00 y hay cuatro filos por cada inserto). El tiempo necesario para recorrer cada inserto = 25 segundos y para remplazar uno de ellos, después de haberlo recorrido cuatro veces, se requieren 45 segundos. La longitud de la pieza de trabajo = 30.0 in y su diámetro = 3.5 in. El costo de la máquina y el operador = $39.00 por hora incluidos los sobrecostos aplicables. La ecuación de la vida de la herramienta de Taylor para esta combinación de herramienta y trabajo está dada por: $vT^{0.23}f^{0.55} = 40.75$, donde T = vida de la herramienta, min; v = velocidad de corte, ft/min; y f = avance, in/rev. Encuentre *a*) el avance en in/rev con el que se logrará el acabado real deseado, *b*) la velocidad de corte para el costo mínimo por pieza dado el avance determinado en el inciso *a*). ***Sugerencia:*** Para resolver *a*) y *b*) se requiere un procedimiento computacional iterativo.

24.29. Compruebe que la derivada de la ecuación (24.8) resulta en la ecuación (24.9).

24.30. Compruebe que la derivada de la ecuación (24.14) resulta en la ecuación (24.15).

25 ESMERILADO Y OTROS PROCESOS ABRASIVOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

El ***maquinado por abrasivos*** implica la eliminación de material por la acción de partículas abrasivas duras que están por lo general adheridas a una rueda. El esmerilado es el proceso abrasivo más importante. En términos del número de máquinas herramientas en uso, el esmerilado es el más común de todas las operaciones de trabajo con máquinas herramienta [11]. Otros procesos por abrasivos incluyen el rectificado, el bruñido, el superacabado, el pulido y el abrillantado. Por lo general, los procesos de maquinado abrasivo se usan como operaciones de acabado, aunque algunos de ellos son capaces de remover grandes cantidades de material que rivalizan con las operaciones de maquinado convencional.

El uso de abrasivos para dar forma a las piezas de trabajo es probablemente el proceso más antiguo de remoción de material (nota histórica 25.1). Las razones por las que los procesos abrasivos son importantes comercial y tecnológicamente en la actualidad, son las siguientes:

- Pueden usarse en todos los tipos de materiales, desde metales suaves hasta aceros endurecidos, y en materiales no metálicos, como cerámicas y silicio.
- Algunos de estos procesos pueden usarse para producir acabados superficiales extremadamente finos de hasta 0.025 μm (1μ-in).
- Para ciertos procesos abrasivos, las dimensiones pueden sujetarse a tolerancias extremadamente estrechas.

El corte con chorro de agua abrasivo y el maquinado ultrasónico también se clasifican algunas veces como procesos abrasivos debido a que realizan el corte por medios similares. Sin embargo, estos procesos se conocen comúnmente como procesos no tradicionales de remoción de material, los cuales se cubren en el capítulo siguiente.

Nota histórica 23.1 *Materiales para herramientas de corte.*

El uso de los abrasivos es más antiguo que cualquiera de las otras operaciones de maquinado. Hay evidencias arqueológicas de que los hombres antiguos usaron piedras abrasivas, como la arenisca natural, para afilar herramientas y armas, y raspar porciones no deseadas de materiales más suaves para hacer implementos domésticos.

El esmerilado se convirtió en una técnica comercial importante en el antiguo Egipto. Las grandes piedras usadas para construir las pirámides se cortaron a su tamaño actual mediante procesos rudimentarios de esmerilado. El esmerilado de metales data alrededor de los 2000 años a.C. y era una habilidad altamente valorada en aquella época.

Los primeros materiales abrasivos fueron aquellos que se encontraban en la naturaleza, como la arenisca, que está compuesta fundamentalmente de cuarzo (SiO_2); el esmeril, que consiste en corindón (Al_2O_3) más una cantidad igual o menor de minerales de hierro hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4), y el diamante. Las primeras ruedas de esmeril fueron probablemente de piedra tallada y giradas a mano. Sin embargo, las ruedas esmeriladoras hechas en esta forma no tenían una calidad consistente.

A inicios del siglo XIX se produjeron en la India las primeras ruedas de esmeril aglutinadas. Se usaron para esmerilar gemas, un importante artículo de comercio en la India en esa época. Los abrasivos fueron el corindón, el esmeril y el diamante. El material aglutinante se hizo de resinas naturales de laca. La tecnología se exportó a Europa y Estados Unidos, donde se introdujeron de manera subsecuente otros materiales aglutinantes: los de hule a mediados del siglo XIX, los vitrificados alrededor de 1870, los de laca aproximadamente en 1880 y los resinosos en la década de 1920 con el desarrollo de los primeros plásticos termoestables (termofijos) (fenol-formaldehído).

A finales del siglo XIX se produjeron los primeros abrasivos sintéticos: carburo de silicio (SiC) y óxido de aluminio (Al_2O_3). Con la fabricación de abrasivos, se pudo controlar más estrechamente su composición química y el tamaño individual de los granos, así se obtuvieron ruedas de esmeril de mayor calidad.

Las primeras máquinas reales de esmerilado fueron hechas en Estados Unidos, por la compañía Brown and Sharpe, en la década de 1860 para esmerilado de piezas de máquinas de coser, una industria importante en ese periodo. Las máquinas esmeriladoras también contribuyeron al desarrollo de la industria de las bicicletas en la década de 1890 y después en la industria automotriz. Los procesos de esmerilado se usaban para ajustar el tamaño y el acabado de ciertas piezas endurecidas por tratamiento térmico en estos productos.

Los superabrasivos como el diamante y el nitruro de boro cúbico son productos del siglo XX. General Electric (GE) produjo los primeros diamantes sintéticos en 1955. Estos abrasivos se usaron para esmerilar herramientas de corte de carburo cementado, y en la actualidad aún es una aplicación importante de los abrasivos de diamante. El nitruro de boro cúbico (CBN), segundo en dureza después del diamante, se sintetizó por primera vez en 1957 por GE, usando un proceso semejante al de la fabricación de diamantes artificiales. El CBN se ha convertido en un abrasivo importante para el esmerilado de aceros endurecidos.

25.1 ESMERILADO

El esmerilado es un proceso de remoción de material en el cual las partículas abrasivas están contenidas en una rueda de esmeril aglutinado que opera a velocidades periféricas muy altas. Por lo general la rueda de esmeril tiene una forma de disco, balanceada con toda precisión para soportar altas velocidades de rotación.

El esmerilado puede equipararse al fresado. En ambas técnicas, el corte ocurre en la periferia o en el frente de la rueda de esmeril, similar al fresado periférico y al fresado frontal. El esmerilado periférico es mucho más común que el esmerilado de frente. La rueda giratoria del esmeril consiste en muchos dientes cortantes (partículas abrasivas) y la pieza de trabajo avanza hacia esta rueda para lograr la remoción del material. A pesar de las similitudes, hay una diferencia significativa entre el esmerilado y el fresado: 1) los granos abrasivos en la rueda son mucho más pequeños y numerosos que los dientes del cortador de una fresa; 2) las velocidades de corte en el esmerilado son mucho más altas que en el fresado; 3) los granos abrasivos en una rueda de esmeril están orientados en forma aleatoria y tienen un ángulo de inclinación promedio muy alto; 4) una rueda de esmeril es autoafilante; al desgastarse la rueda, las partículas abrasivas pierden el filo y se

fracturan para crear nuevos bordes cortantes, o se eliminan de la superficie de la rueda para dejar expuestos nuevos granos.

25.1.1 La rueda de esmeril

Una rueda de esmeril consiste en partículas abrasivas y material aglutinante. Los materiales aglutinantes mantienen a las partículas en su lugar y establecen la forma y la estructura de la rueda. Estos dos ingredientes y la forma en que se fabrican determinan los cinco parámetros básicos de la rueda de esmeril: 1) material abrasivo, 2) tamaño del grano, 3) material aglutinante, 4) Dureza de la rueda y 5) estructura de la rueda. Para lograr el desempeño deseado en una aplicación dada, debe seleccionarse cada parámetro con extremo cuidado.

Material abrasivo Los diferentes materiales abrasivos se adecuan para esmerilar diferentes materiales de trabajo. Las propiedades generales de un material abrasivo para las ruedas de esmeril incluyen alta dureza, resistencia al desgaste, tenacidad y fragilidad. La dureza, la resistencia y la tenacidad son propiedades convenientes para cualquier material de herramienta de corte. La fragilidad se refiere a la capacidad del material abrasivo a fracturarse cuando el filo de corte del grano se desgasta, exponiendo así un nuevo filo de corte.

El desarrollo de los abrasivos para esmerilar se describió en la nota histórica. En la actualidad, los materiales abrasivos de mayor importancia comercial son el óxido de aluminio, el carburo de silicio, el nitruro de boro cúbico y el diamante; en la tabla 25.1 se presenta una descripción de estos materiales junto con sus valores relativos de dureza.

Tamaño del grano El tamaño de grano de las partículas abrasivas es un parámetro importante en la determinación del acabado superficial y de la velocidad de remoción del material. El tamaño de grano pequeño produce mejores acabados, mientras que los mayores tamaños de grano permiten velocidades de remoción de material más grandes. Por lo tanto, cuando se selecciona el tamaño de granos abrasivos, debe tomarse en cuenta ambos parámetros. La selección del tamaño de grano depende también hasta cierto punto del tipo de material de trabajo. Los materiales de trabajo más duros requieren tamaño de grano más pequeño para un corte efectivo, mientras que los materiales más suaves requieren tamaños de granos más grandes.

El tamaño de grano se mide mediante el procedimiento de cribas y mallas, descrito en la sección 16.1. En este procedimiento, los tamaños de grano más pequeños tienen nú-

TABLA 25.1 Abrasivos de mayor importancia en el esmerilado.

Abrasivo	Descripción	Dureza Knoop
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	Es el material abrasivo más común (sección 7.3.1). Se usa para esmerilado acero y otras aleaciones ferrosas de alta resistencia.	2 100
Carburo de silicio (SiC)	Es más duro que el Al_2O_3, pero no tan tenaz (sección 7.2.2). Sus aplicaciones incluyen metales dúctiles, como el aluminio, el latón y el acero inoxidable, así como materiales frágiles, como algunas fundiciones de hierro y ciertos cerámicos. No puede usarse efectivamente para el esmerilado de acero debido a la fuerte afinidad química entre el carbono en SiC y el hierro en el acero.	2 500
Nitruro de boro cúbico (CBN)	Cuando se usa como abrasivo, el CBN (sección 7.3.3) se produce bajo el nombre comercial de Borazon, por General Electric Company. Las ruedas de esmeril de CBN se usan para materiales duros, como aceros de herramienta endurecidos y aleaciones aeroespaciales.	5 000
Diamante	Los abrasivos de diamante se dan en forma natural y también pueden hacerse sintéticamente (sección 7.5.1). Las ruedas de diamante se usan generalmente en aplicaciones de esmerilado de materiales abrasivos duros, como cerámicos, carburos cementados y vidrio.	7 000

TABLA 25.2 Materiales aglutinantes usados en ruedas de esmeril.

Material aglutinante	Descripción
Aglutinante vitrificado	Consiste principalmente en arcilla cocida y materiales cerámicos. La mayoría de las ruedas de esmeril de uso común son ruedas con aglutinantes vitrificados, fuertes y rígidos, resistentes a las temperaturas elevadas y casi no se ven afectados con el agua y los aceites que pudiesen usarse en los fluidos de esmerilado.
Aglutinante de silicato	Consiste en silicato de sodio (Na_2SO_3). Sus aplicaciones se limitan generalmente a situaciones en las que se debe minimizar la generación de calor, como en el esmerilado de herramientas de corte.
Aglutinante de hule	Es el más flexible de los materiales aglutinantes. Se usa como material aglutinante en las ruedas de corte.
Aglutinante de resina	Consiste en materiales con diferentes resinas termoestables, como fenol-formaldehído. Tiene una gran resistencia y se usa para esmerilado grueso y operaciones de corte.
Aglutinante de laca	Son relativamente fuertes pero no rígidas. Se usan con frecuencia en aplicaciones que requieren un buen acabado.
Aglutinante metálico	El metal, por lo general bronce, es el material aglutinante más común para ruedas de diamante y de nitruro de boro cúbico. Se usan procedimientos técnicos de procesamiento de partículas (capítulos 16 y 17) para aglutinar la matriz de los granos abrasivos, en los cuales se pega el material únicamente en la periferia de la rueda, y de esta forma se conservan los costosos materiales abrasivos.

meros más grandes y viceversa. El tamaño de los granos usados en las ruedas de esmeril fluctúan típicamente entre 8 y 250. El grano tamaño 8 es muy grueso y el tamaño 250 es muy fino. Los tamaños de grano más fino se utilizan para el bruñido y el superacabado (sección 25.2).

Materiales aglutinantes El material aglutinante sujeta los granos abrasivos y establece la forma y la integridad estructural de la rueda de esmeril. Las propiedades convenientes del material aglutinante incluyen la resistencia, la tenacidad, la dureza y la resistencia a la temperatura. El material aglutinante debe ser capaz de soportar las fuerzas centrífugas y las altas temperaturas experimentadas por la rueda de esmeril, y resistir sin quebrarse ante los impactos de la rueda; también deben sostener los granos abrasivos rígidamente en su lugar para lograr la acción de corte y permitir el desalojo de los granos gastados, de manera que se expongan nuevos granos. En la tabla 25.2 se identifican y se describen brevemente los materiales aglutinantes utilizados con mayor frecuencia en las ruedas de esmeril.

Estructura de la rueda y dureza de la rueda La ***estructura de la rueda*** se refiere al espaciamiento relativo entre los granos abrasivos en la rueda. Además de los granos abrasivos y el material aglutinante, las ruedas de esmeril contienen huecos de aire o poros, como se ilustra en la figura 25.1. Las proporciones volumétricas de los granos, el material aglutinante y los poros pueden expresarse como:

$$P_g + P_b + P_p = 1.0 \tag{25.1}$$

donde P_g = proporción de los granos abrasivos en el volumen total de la rueda, P_b = proporción del material aglutinante y P_p = proporción de los poros (huecos).

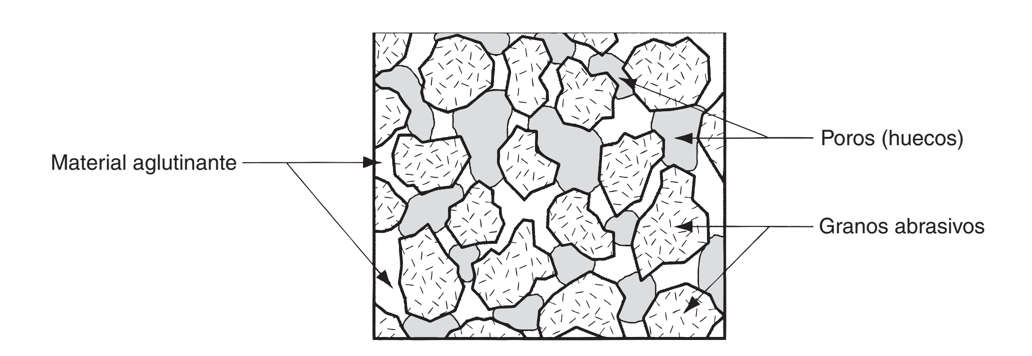
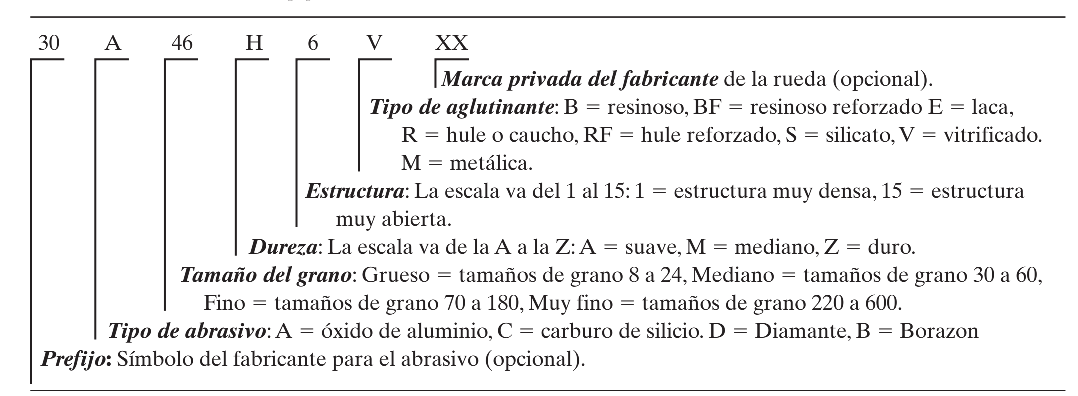


FIGURA 25.1 Estructura típica de una rueda de esmeril.

TABLA 25.3 Sistema de identificación para ruedas de esmeril convencionales definido por la norma ANSI B74.13-1977 [3].


30 A 46 H 6 V XX

Marca privada del fabricante de la rueda (opcional).

Tipo de aglutinante: B = resinoso, BF = resinoso reforzado E = laca, R = hule o caucho, RF = hule reforzado, S = silicato, V = vitrificado. M = metálica.

Estructura: La escala va del 1 al 15: 1 = estructura muy densa, 15 = estructura muy abierta.

Dureza: La escala va de la A a la Z: A = suave, M = mediano, Z = duro.

Tamaño del grano: Grueso = tamaños de grano 8 a 24, Mediano = tamaños de grano 30 a 60, Fino = tamaños de grano 70 a 180, Muy fino = tamaños de grano 220 a 600.

Tipo de abrasivo: A = óxido de aluminio, C = carburo de silicio. D = Diamante, B = Borazon

***Prefijo*:** Símbolo del fabricante para el abrasivo (opcional).

La estructura de la rueda se mide en una escala que va de "abierta" a "densa". Una estructura abierta es aquella en la que P_p es relativamente grande y P_g es relativamente pequeña. Esto es, hay muchos poros y pocos granos por unidad de volumen en una rueda de estructura abierta. Por el contrario, en una estructura densa P_p es relativamente pequeña y P_g es más grande. En general, se recomiendan estructuras abiertas en situaciones donde se debe proveer espacios libres para la viruta. Las estructuras densas se usan para obtener mejores acabados superficiales y control dimensional.

La dureza de la rueda indica la resistencia del aglutinante de la rueda de esmeril para retener los granos abrasivos durante el corte. Esto depende en gran medida de la cantidad de material aglutinante presente en la estructura de la rueda, P_b, en la ecuación (25.1). La dureza se mide en una escala que va de suave a duro. Las ruedas "suaves" pierden los granos fácilmente, mientras que las ruedas "duras" retienen los granos abrasivos. Las ruedas suaves se usan generalmente para aplicaciones que requieren una baja velocidad de remoción de material y en el esmerilado de materiales de trabajo duros. Las ruedas duras se usan típicamente para lograr altas velocidades de remoción de material y para el esmerilado de materiales de trabajo relativamente suaves.

Especificación de las ruedas de esmeril Los parámetros precedentes se pueden designar concisamente usando un sistema de especificación de ruedas de esmeril definido por la American National Standards Institute (ANSI) [3]. Este sistema de especificación usa números y letras para identificar el tipo de abrasivo, el tamaño del grano, la dureza, la estructura y el material aglutinante. En la tabla 25.3 se presenta una versión abreviada de la norma ANSI que indica cómo se interpretan los números y las letras. La norma también proporciona identificaciones adicionales que pueden utilizar los fabricantes de ruedas de esmeril.

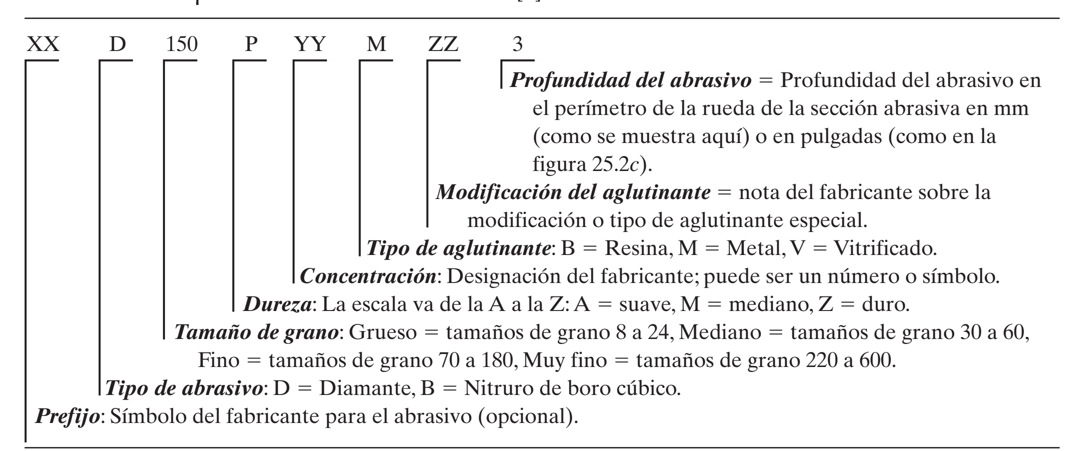
La norma ANSI para las ruedas de esmerilado de diamante y de nitruro de boro cúbico es ligeramente diferente que la de las ruedas convencionales. El sistema de especificación para estas nuevas ruedas de v se presenta en la tabla 25.4.

Las ruedas de esmerilado tienen en una variedad de formas y tamaños, como se muestra en la figura 25.2. Las configuraciones *a*), *b*) y *c*) son ruedas de esmerilado periféricas, en las cuales la remoción de material la realiza la circunferencia exterior de la rueda. En el inciso *d*) se muestra una rueda para esmerilado de corte típica, la cual involucra también el corte periférico. Las ruedas *e*), *f*) y *g*) son ruedas de esmerilado frontal, en las cuales la cara plana de la rueda remueve el material de la superficie de trabajo.

25.1.2 Análisis del proceso de esmerilado

Las condiciones de corte en el esmerilado se caracterizan por velocidades muy altas y cortes muy pequeños, comparados con el fresado y otras operaciones de maquinado tradicional. Si se usa el esmerilado superficial de la figura 25.3*a*) para ilustrar las caracterís-

TABLA 25.4 Sistema de identificación para ruedas de esmeril de diamante y nitruro de boro cúbico definido por la norma ANSI B74.13-1977 [3].



XX D 150 P YY M ZZ 3

Profundidad del abrasivo = Profundidad del abrasivo en el perímetro de la rueda de la sección abrasiva en mm (como se muestra aquí) o en pulgadas (como en la figura 25.2*c*).

Modificación del aglutinante = nota del fabricante sobre la modificación o tipo de aglutinante especial.

Tipo de aglutinante: B = Resina, M = Metal, V = Vitrificado.

Concentración: Designación del fabricante; puede ser un número o símbolo.

Dureza: La escala va de la A a la Z: A = suave, M = mediano, Z = duro.

Tamaño de grano: Grueso = tamaños de grano 8 a 24, Mediano = tamaños de grano 30 a 60, Fino = tamaños de grano 70 a 180, Muy fino = tamaños de grano 220 a 600.

Tipo de abrasivo: D = Diamante, B = Nitruro de boro cúbico.

Prefijo: Símbolo del fabricante para el abrasivo (opcional).

FIGURA 25.2 Algunas formas estándar de ruedas abrasivas: *a*) recta, *b*) con cavidades de los dos lados, *c*) rueda con cuerpo metálico y abrasivo adherido en la circunferencia, *d*) disco abrasivo de corte, *e*) rueda cilíndrica, *f*) rueda de copa recta y *g*) rueda de copa angular.

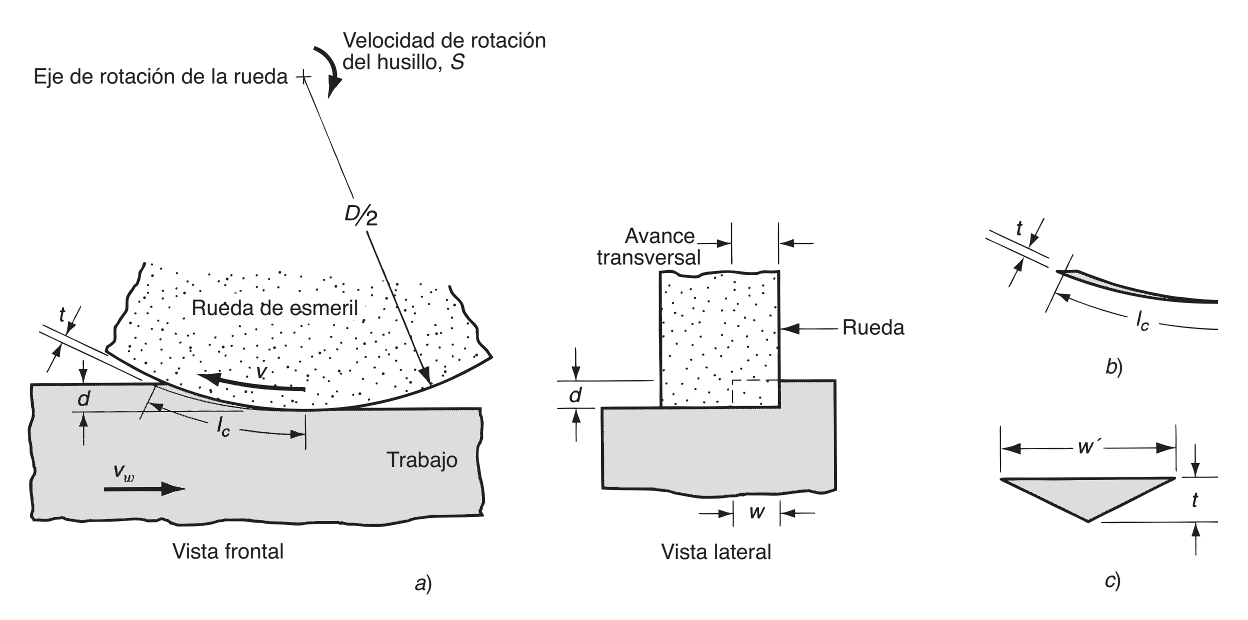


FIGURA 25.3 *a*) La geometría de la superficie de esmerilado muestra las condiciones de corte; *b*) implica la forma longitudinal y *c*) la sección transversal de una viruta simple.

ticas principales del proceso, la velocidad periférica de la rueda de esmeril se determina mediante la velocidad de rotación de la rueda:

$$v = \pi DN \tag{25.2}$$

donde v = velocidad lineal de la rueda, m/min (ft/min); N = velocidad de rotación del husillo, rev/min; y D = diámetro de la rueda, m (ft).

La profundidad del corte d, llamada ***avance radial***, es la penetración de la rueda dentro de la superficie original de trabajo. Al proseguir la operación, la rueda de esmeril avanza lateralmente a través de la superficie en cada ciclo de trabajo. Esto se llama ***avance transversal*** y determina el ancho de la trayectoria del esmerilado w en la figura 25.3*a*). Este ancho, multiplicado por la profundidad d, determina el área de la sección transversal de corte. En la mayoría de las operaciones de esmerilado, el trabajo se mueve contra la rueda a una cierta velocidad v_w, de manera que la velocidad de remoción de material es:

$$R_{MR} = v_w wd \tag{25.3}$$

Cada grano de la rueda de esmeril corta una viruta individual, cuya forma antes del corte se muestra en la figura 25.3*b*) y cuya forma de sección transversal supuesta es triangular, como en la figura 25.3*c*). En el punto de salida del grano respecto al trabajo, donde la sección transversal de la viruta es mayor; este triángulo tiene una altura t y un ancho w'.

En una operación de esmerilado, lo que interesa es cómo se combinan las condiciones de corte con los parámetros de la rueda de esmeril para afectar los siguientes aspectos: 1) acabado superficial, 2) fuerzas y energía, 3) temperatura de la superficie de trabajo, 4) desgaste de la rueda.

Acabado superficial La mayor parte del esmerilado comercial se realiza para lograr acabados superficiales superiores a los que puede alcanzarse con maquinado convencional. El acabado superficial de la pieza de trabajo lo afecta el tamaño de las virutas individuales que se forman durante el esmerilado. Un factor obvio en la determinación del tamaño de viruta es el tamaño del grano; los tamaños más pequeños de grano o partículas rinden mejores acabados.

A continuación, se examinan las dimensiones de una viruta individual. A partir de la geometría del proceso de esmerilado en la figura 25.3, puede mostrarse que la longitud promedio de una viruta está dada por

$$l_c = \sqrt{Dd} \tag{25.4}$$

donde I_c es la longitud de la viruta, mm (in); D = diámetro de la rueda, mm (in); y d = profundidad de corte o avance radial, mm (in). Se supone que la viruta la forma un grano que actúa a través de todo el arco barrido que se muestra en el diagrama.

En la figura 25.3*c*) se muestra la sección transversal supuesta para una viruta en esmerilado. La forma de la sección transversal es triangular con un ancho w', y es más grande que el espesor t por un factor llamado relación de aspecto del grano r_g, definido por

$$rg = \frac{w'}{t} \tag{25.5}$$

Los valores típicos del aspecto del grano están entre 10 y 20.

El número de granos o partículas activas (dientes cortantes) por pulgada cuadrada en la periferia de la rueda de esmeril se denota por C, cuyo valor es por lo general inversamente proporcional al tamaño del grano. Se relaciona C también con la estructura de la rueda. Una estructura más densa implica más granos por área. Con base en el valor de C, el número de virutas formadas por unidad de tiempo n_c está dado por

$$n_c = vwC \tag{25.6}$$

donde v = velocidad de la rueda, mm/min (in/min); w = avance transversal, mm (in); y C = granos por área en la superficie de la rueda de esmeril, granos/mm^2 (granos/in^2). Se da por entendido que el acabado superficial mejorará al aumentar el número de virutas formadas por unidad de tiempo, sobre la superficie del trabajo para un ancho dado w. Por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (25.6), al incrementar v o C se mejorará el acabado. Debe recordarse que los tamaños de grano más pequeños rinden valores de C más grandes.

Fuerzas y energía Si se conociera la fuerza requerida para pasar el trabajo contra una rueda de esmeril, la energía específica en el esmerilado podría determinarse como

$$U = \frac{F_c v}{v_w w d} \tag{25.7}$$

donde U = energía específica, J/mm^3 (in-lb/in^3); F_c = la fuerza de corte necesaria para pasar el trabajo contra la rueda, N (lb); v = velocidad de la rueda, m/min (ft/min); v_w = velocidad del trabajo, mm/min (in/min); w = ancho del corte, mm (in); y d = profundidad de corte, mm (in).

En el esmerilado, la energía específica es mucho más grande que en el maquinado convencional. Hay varias razones para esto. La primera es el ***efecto del tamaño*** en el maquinado. Como se analizó previamente, el espesor de la viruta en el esmerilado es mucho menor que para otras operaciones de maquinado, como el fresado. De acuerdo con este efecto de tamaño (sección 21.4), los tamaños más pequeños de viruta en el esmerilado ocasionan que la energía requerida para remover cada unidad de volumen de material sea significativamente más alta que en el maquinado convencional: aproximadamente diez veces más alta.

Segundo, los granos individuales en una rueda de esmeril tienen ángulos de inclinación extremadamente negativos. El ángulo de inclinación promedio es de aproximadamente −30°, y se cree que en algunos granos individuales hay valores de hasta −60°. Estos ángulos de inclinación muy bajos dan por resultado valores bajos para el ángulo del plano de corte y altas deformaciones cortantes; los dos hechos anteriores implican niveles de energía más altos en el esmerilado.

Tercero, la energía específica es más alta en el esmerilado porque no todas las partículas individuales se involucran en el corte real. Debido a sus posiciones y a las orientaciones aleatorias de los granos en la rueda, algunos granos no se proyectan lo suficiente dentro de la superficie de trabajo para realizar el corte. Pueden reconocerse tres tipos de acciones

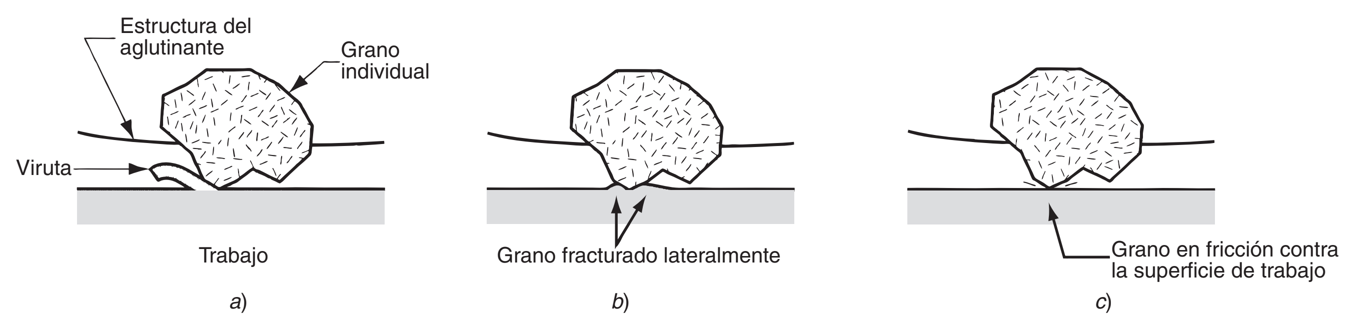


FIGURA 25.4 Tres tipos de acción de los granos en esmerilado: *a*) corte, *b*) fractura, y *c*) fricción.

de los granos, como se ilustra en la figura 25.4: *a*) Granos de ***corte***, en el cual los granos penetran bastante dentro de la superficie para formar una viruta y remover el material: *b*) ***Granos fracturados***, en el cual el grano penetra dentro del trabajo, pero no lo suficiente para causar corte; en su lugar, la superficie del trabajo se deforma y la energía se consume generando calor sin ninguna remoción de material; y *c*) ***fricción***, en el cual el grano toca la superficie durante su recorrido, pero solamente ocurre fricción de roce, la cual consume energía generando calor sin remover ningún material.

El efecto del tamaño, los ángulos de inclinación negativa y las acciones ineficientes de los granos se combinan para causar que los procesos de esmerilado sean muy ineficientes en términos de consumo de energía por volumen de material removido.

Si se usan las relaciones de energía específica de la ecuación (25.7), y se supone que las fuerzas de corte que actúan en un solo grano de la rueda de esmeril son proporcionales a $r_g t$, puede demostrarse [9] que

$$F'_c = K_1 \left(\frac{r_g v_w}{vC} \right)^{0.5} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.25} \tag{25.8}$$

donde F'_c es la fuerza de corte que actúa sobre un grano individual, K_1 es una constante de proporcionalidad que depende de la resistencia del material que se corta y de la agudeza de los granos individuales; los otros términos se definieron con anterioridad. La significación práctica de esta relación es que afecte o no F'_c a los granos individuales, jalará hacia afuera de la rueda de esmeril, un factor importante en la capacidad de la rueda para reafilarse a sí misma. Con referencia al análisis previo del grado de la rueda, puede lograrse que una rueda dura parezca más suave al incrementar la fuerza de corte que actúa sobre los granos individuales a través de ajustes apropiados en v_w, v y d, de acuerdo con la ecuación (25.8).

Temperaturas en la superficie de trabajo Debido al efecto de tamaño de grano, a los ángulos de inclinación altamente negativos, la profundidad del corte y a la fricción de los granos abrasivos contra la superficie de trabajo, el proceso de esmerilado se caracteriza por altas temperaturas y alta fricción. Al contrario de las operaciones convencionales de maquinado en las cuales la mayor parte de la energía calorífica generada en el proceso se va con la viruta, la mayor parte de la energía en el esmerilado permanece en la superficie trabajada [11], lo que ocasiona altas temperaturas de la superficie de trabajo. Las altas temperaturas superficiales tienen varios efectos dañinos posibles, sobre todo quemaduras y grietas en la superficie. Las marcas de quemaduras aparecen como decoloraciones de la superficie debidas a la oxidación. A menudo, las quemaduras por esmerilado son una señal de daño metalúrgico justo debajo de la superficie. Las grietas superficiales son perpendiculares a la dirección de la velocidad de la rueda. Éstas indican un caso extremo de daño térmico en la superficie de trabajo.

Un segundo efecto térmico perjudicial es el ablandamiento de la superficie de trabajo. Muchas operaciones de esmerilado se realizan sobre piezas que han sido tratadas térmicamente para obtener alta dureza. Las altas temperaturas de esmerilado pueden hacer que la superficie pierda algo de su dureza. El tercer efecto térmico en el esmerilado

puede causar esfuerzos residuales en la superficie de trabajo y posible decrecimiento en la resistencia a la fatiga de la pieza.

Resulta importante entender qué factores tienen influencia en la temperatura de la superficie de trabajo en el esmerilado. Se ha observado de manera experimental que la temperatura superficial depende de la energía por área superficial esmerilada (relacionada estrechamente con la energía específica U). Como ésta varía de manera inversa con el espesor de la viruta, puede demostrarse que la temperatura superficial T_s se relaciona con los parámetros del esmerilado de la siguiente manera [9]:

$$T_s = K_2 d^{0.75} \left(\frac{r_g C_v}{v_w} \right)^{0.5} D^{0.25} \tag{25.9}$$

donde K_2 = una constante de proporcionalidad. La implicación práctica de esta relación es que el daño superficial debido a la alta temperatura del trabajo puede mitigarse al disminuir la profundidad de corte d, la velocidad de la rueda v y el número de partículas activas por pulgada cuadrada en la rueda de esmeril C, o al incrementar la velocidad de trabajo v_w. Además, las ruedas de esmeril desgastadas y las ruedas que tienen alta dureza y estructura densa, tienden a causar problemas térmicos. Por supuesto, el uso de un fluido de corte también puede reducir las temperaturas de esmerilado.

Desgaste de la rueda Las ruedas de esmeril se desgastan como cualquier herramienta de corte convencional. Se reconocen tres mecanismos como las causas principales de desgaste en las ruedas de esmeril: 1) fractura de granos, 2) desgaste por rozamiento y 3) fractura del aglutinante. La ***fractura del grano*** ocurre cuando una porción de los granos se rompe, pero el resto permanece aglutinado en la rueda. Los filos del área fracturada se convierten en nuevos filos de corte en la rueda de esmeril. La tendencia del grano a fracturarse se denomina ***fragilidad***. Una alta fragilidad significa que los granos se fracturan más rápidamente debido a las fuerzas de corte en los granos F_c'.

El ***desgaste por rozamiento*** involucra el desgaste de los granos individuales que dan como resultado zonas planas y filos redondeados. Este tipo de desgaste es análogo al desgaste de una herramienta de corte convencional. Se debe a mecanismos físicos similares, incluidas la fricción y la difusión, así como las reacciones químicas que se originan entre el material abrasivo y el de trabajo en presencia de temperaturas muy altas.

La ***fractura del aglutinante*** ocurre cuando los granos individuales son expulsados del material aglutinante. La tendencia hacia este mecanismo depende del grado de la rueda, entre otros factores. La fractura del aglutinante ocurre generalmente porque el grano se ha despegado debido al desgaste por roce, y la fuerza resultante del corte es excesiva. Los granos afilados cortan de manera más efectiva con fuerzas de corte más bajas; por lo tanto, éstos permanecen fijos en la estructura del aglutinante.

Los tres mecanismos se combinan para ocasionar que la rueda de esmeril se desgaste, como se describe en la figura 25.5. Pueden identificarse tres regiones de desgaste. En la primera región, los granos son agudos inicialmente y el desgaste se acelera debido a

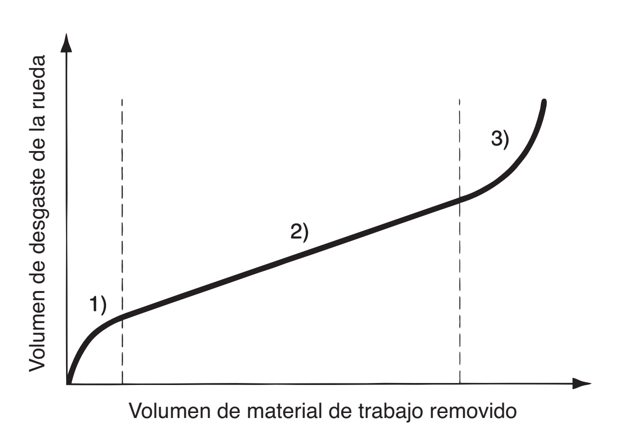


FIGURA 25.5 Curva de desgaste típica de una rueda de esmeril. El desgaste se grafica convenientemente en función del volumen de material removido, en lugar de hacerlo en función del tiempo (con base en [16]).

la fractura de los granos. Éste corresponde al periodo de “irrupción” en el desgaste convencional de la herramienta. En la segunda región, la velocidad de desgaste es bastante constante y provoca una relación lineal entre la rueda de esmeril y el volumen de metal removido. La característica principal de esta región es el desgaste por rozamiento, con algo de fractura de granos y de aglutinante. En la tercera sección de la curva de desgaste de la rueda, los granos se vuelven lisos y las magnitudes de la depresión y del rozamiento se incrementan en relación con el corte. Además, algunas de las virutas se quedan atrapadas en los poros de la rueda. A esto se le llama ***tapado de la rueda***; dicho efecto impide la acción de corte y conduce a un mayor calentamiento y a temperaturas superficiales de trabajo. Como consecuencia, la eficiencia del esmerilado decrece y el volumen de la rueda removida aumenta en relación con el volumen del metal removido.

La ***relación de*** esmerilado es un término usado para indicar la pendiente de la curva de desgaste de la rueda. En forma específica,

$$GR = \frac{V_w}{V_g} \tag{25.10}$$

donde GR = relación de esmerilado, V_w = volumen de material de trabajo removido y V_g = volumen correspondiente de la rueda de rectificado que se gasta durante el proceso. La relación de esmerilado tiene el valor más significativo en la región de desgaste lineal de la figura 25.5. Los valores típicos de GR están entre 95 y 125 [5], lo que significa que están cerca de cinco órdenes de magnitud menos que la relación análoga en el maquinado convencional. La relación de esmerilado por lo general se incrementa cuando aumenta la velocidad de la rueda v. La razón es que el tamaño de la viruta formada por cada grano es más pequeño a velocidades más altas, así que la cantidad de fracturas de grano se reduce. Como las velocidades más altas de la rueda mejoran también el acabado superficial, hay una ventaja general al operar a altas velocidades de esmerilado. Sin embargo, cuando las velocidades se incrementan demasiado, aumenta el desgaste por fricción y la temperatura. Como resultado, la relación de rectificado se reduce y el acabado superficial se demerita. Como se muestra en la figura 25.6, este efecto lo registró originalmente Krabacher [14].

Cuando la rueda está en la tercera región de la curva de desgaste, debe reafilarse mediante un procedimiento llamado ***aderezado***, que consiste en 1) romper los granos desgastados en la periferia exterior de la rueda de rectificado a fin de exponer granos afilados frescos y 2) remover las virutas que se han quedado atrapadas en los poros de la rueda. Esto se logra por medio de un disco giratorio, una barra abrasiva u otra rueda de rectificado operando a alta velocidad, sostenida contra la rueda que se adereza cuando está girando. Aunque el aderezado afila la rueda, no garantiza la forma de la rueda. El ***formado*** es un procedimiento alternativo que no sólo afila la rueda, sino que también restaura su forma cilíndrica y asegura la rectitud de su perímetro exterior. El procedimiento implica el uso de una herramienta de punta de diamante (se puede usar también otros tipos de herramienta

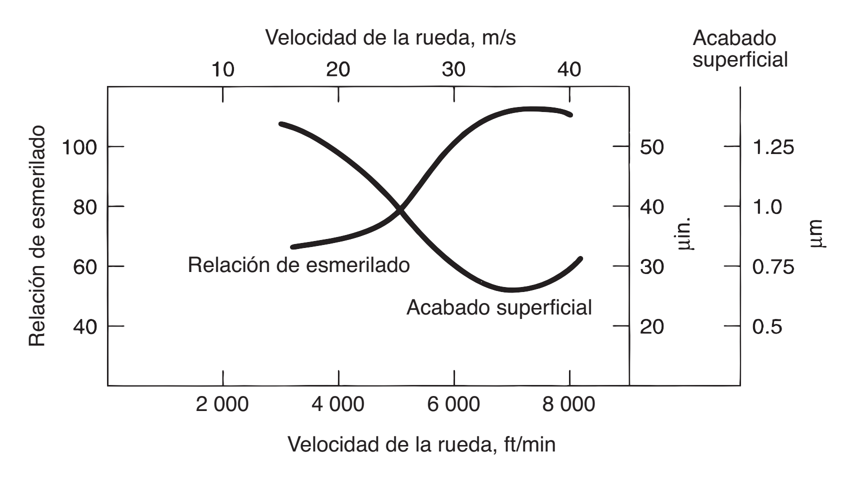


FIGURA 25.6 Relación de esmerilado y acabado superficial en función de la velocidad de la rueda. (Con base en datos de Krabacher [14]).

para rectificar) que avanza lentamente y con precisión a través de la rueda conforme ésta gira. Lo anterior sucede a una profundidad muy ligera de la rueda (0.025 mm o menos).

25.1.3 Consideraciones en la aplicación del esmerilado

En esta sección, se intentan resumir las revisiones previas sobre los parámetros de la rueda y el análisis teórico del esmerilado, así como sus aplicaciones prácticas. También se consideran los fluidos para esmerilado que se usan comúnmente en estos procesos.

Lineamientos de aplicación Existen muchas variables en el rectificado que afectan su desempeño y el éxito de la operación. Los lineamientos listados en la tabla 25.5 son útiles para clasificar las numerosas complejidades y seleccionar los parámetros apropiados de la rueda y las condiciones de esmerilado.

Fluidos de esmerilar La aplicación adecuada de los fluidos de corte ha sido efectiva para reducir los efectos térmicos y las altas temperaturas superficiales de trabajo descritas con anterioridad. Cuando estos fluidos se usan en la operación de esmerilado, se llaman fluidos de esmerilar. Las funciones que desempeñan son similares a las de los fluidos de corte (sección 23.4). Dos funciones comunes son reducir la fricción y eliminar el calor de los procesos. Además, el lavado de las virutas y la reducción de la temperatura de la superficie de trabajo son muy importantes en el esmerilado.

Los tipos de fluidos de esmerilado incluyen en su composición química aceites de esmerilar y aceites solubles al agua. Los aceites de esmerilar se derivan del petróleo y otras fuentes. Estos productos son atractivos debido a que la fricción es un factor importante en el esmerilado. Sin embargo, presentan riesgos de incendio y de la salud para el operador y su costo es alto en relación con los aceites solubles. Además, su capacidad de eliminar el calor es menor que la de los fluidos solubles en agua.

Por esto se recomiendan comúnmente las mezclas de aceite en agua como fluidos de esmerilar, cuyas concentraciones son más altas que los aceites solubles para corte convencional; de esta forma se refuerza el mecanismo de reducción de la fricción.

TABLA 25.5 Lineamientos de aplicación para el esmerilado.

Problema u objetivo de aplicación	Recomendación o lineamiento
Esmerilar acero y la mayoría de las aleaciones de hierro	Seleccione el óxido de aluminio como abrasivo.
Esmerilar la mayoría de los metales no ferrosos	Seleccione el carburo de silicio como abrasivo.
Esmerilar aceros de herramienta endurecidos y ciertas aleaciones aeroespaciales	Seleccione el nitruro de boro cúbico (Borazón) como abrasivo.
Esmerilar materiales abrasivos duros, como cerámicos, carburos cementados y vidrio	Seleccione el diamante como abrasivo
Esmerilar metales suaves	Seleccione un tamaño grande de grano y el grado de rueda más duro
Esmerilar metales duros	Seleccione un tamaño de grano pequeño y una dureza de rueda menor
Optimizar el acabado superficial	Seleccione una estructura de rueda densa con granos de tamaño pequeño. Use velocidades más altas (v) y velocidades de trabajo bajas (v_w)
Maximizar la velocidad de remoción de material	Seleccione un tamaño grande de grano, estructura de rueda más abierta y aglutinante vitrificado
Minimizar el daño por calor, el agrietado y el torcido de la superficie de trabajo	Mantenga el filo de la rueda. Aderece la rueda frecuentemente. Use profundidades de corte menores (d), velocidades de rueda más bajas (v), velocidades de trabajo más rápidas (v_w)
Si la rueda de esmeril se abrillanta y se quema	Seleccione una rueda de dureza menor y una estructura más abierta
Si la rueda de esmeril se rompe demasiado rápido	Seleccione una rueda de mayor dureza y una estructura más densa.

Recopilado de [7], [11] y [16].

25.1.4 Operaciones de esmerilado y máquinas de esmerilar

El rectificado se usa tradicionalmente para el acabado de piezas cuya geometría ha sido creada mediante otras operaciones. Por consiguiente, se han diseñado máquinas para rectificar superficies planas, cilindros exteriores o interiores y formas de contorno, como roscas. Los contornos se crean frecuentemente por medio de ruedas de formado especial, que tienen el contorno opuesto al que se desea impartir al trabajo. El rectificado se usa también en los cuartos de herramientas para formar la geometría de las herramientas de corte. Además de estos usos tradicionales, las aplicaciones del esmerilado se están expandiendo para incluir operaciones de más alta velocidad y más alta remoción de material. El estudio de las operaciones y de las máquinas en esta sección incluyen los siguientes tipos: 1) Esmerilado de superficies planas, 2) esmerilado de superficies cilíndricas, 3) esmerilado sin centros, 4) esmerilado de alta remoción de material, 5) otras operaciones de esmerilado.

El esmerilado de superficies planas Se usa normalmente, como su nombre lo indica, para el esmerilado de superficies planas. Se realiza ya sea con la periferia de la rueda de esmeril o con la cara plana de la rueda. Como el trabajo se sostiene normalmente en una orientación horizontal, el esmerilado periférico se realiza girando la rueda en un eje horizontal, y el esmerilado frontal se realiza girando la rueda en un eje vertical. En cualquier caso, el movimiento relativo de la pieza de trabajo se logra mediante un movimiento oscilante de la pieza de trabajo frente a la rueda o haciéndola girar. Estas posibles combinaciones de las orientaciones de los movimientos de la rueda y de la pieza de trabajo producen los cuatro tipos de máquinas de esmerilado superficial que se ilustran en la figura 25.7.

De los cuatro tipos, la máquina de husillo horizontal con mesa oscilante, y que es la más común, se muestra en la figura 25.8. El esmerilado se realiza haciendo oscilar el trabajo en forma longitudinal bajo la rueda a una profundidad muy pequeña (avance normal) y haciendo avanzar la rueda en forma transversal dentro del trabajo una cierta distancia

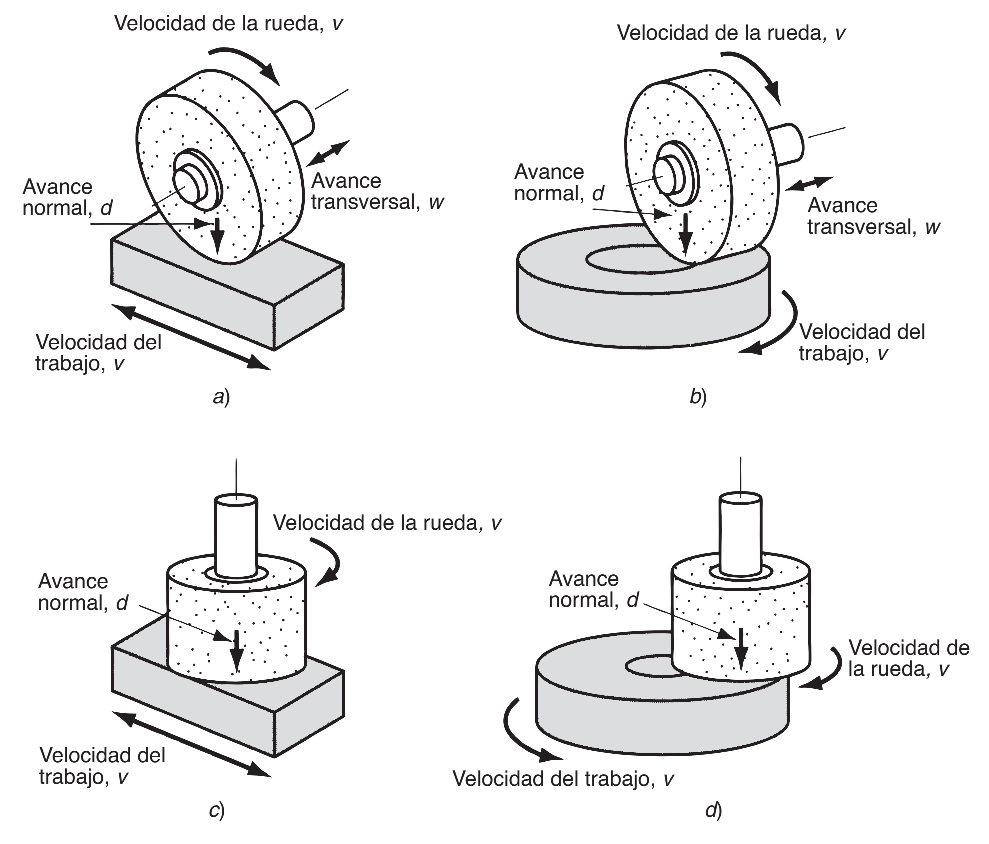


FIGURA 25.7 Cuatro tipos de esmeriladoras de superficies planas: *a*) husillo horizontal con mesa de trabajo oscilante, *b*) husillo horizontal con mesa de trabajo giratoria, *c*) husillo vertical con mesa de trabajo oscilante y *d*) husillo vertical con mesa de trabajo giratoria.

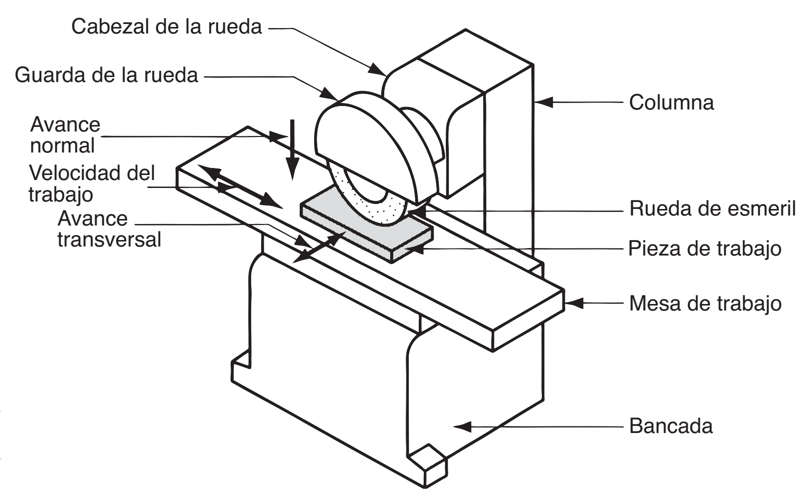


FIGURA 25.8 Esmeriladora de superficies planas con husillo horizontal y mesa de trabajo oscilante.

entre cada recorrido. En estas operaciones el ancho de la rueda es generalmente menor que el de la pieza de trabajo.

Además de sus aplicaciones convencionales, una máquina de esmerilado con husillo horizontal y mesa oscilante puede usarse para formar superficies con contornos especiales empleando una rueda de rectificado perfilada. En lugar de hacer avanzar la rueda transversalmente sobre el trabajo conforme éste oscila, la rueda ***penetra*** verticalmente en el trabajo. Por lo tanto, la forma de la rueda se transfiere a la superficie del trabajo.

Las máquinas de esmerilar con husillos verticales y mesas oscilantes se montan para que el diámetro de la rueda sea mayor que el ancho del trabajo. En consecuencia, estas operaciones pueden realizarse sin necesidad de usar un movimiento de avance transversal. En su lugar, el esmerilado se realiza haciendo oscilar el trabajo enfrente de la rueda y haciendo avanzar la rueda verticalmente en el trabajo a la dimensión deseada. Esta configuración es capaz de lograr una superficie muy plana en el trabajo.

De los dos tipos de mesa rotatoria para esmerilado de la figura 25.7*b*) y *d*), las máquinas de husillo vertical son las más comunes. Debido a la superficie de contacto relativamente grande que existe entre la rueda y la pieza de trabajo, las máquinas de esmerilar de mesa rotatoria y husillo vertical son capaces de altas velocidades de remoción del metal cuando están equipadas con las ruedas de esmeril apropiadas.

Esmerilado cilíndrico Como su nombre lo indica, se usa para piezas de revolución. Estas operaciones de esmerilado se dividen en dos tipos básicos, figura 25.9: *a*) esmerilado cilíndrico externo y *b*) esmerilado cilíndrico interno.

El esmerilado ***cilíndrico externo*** (también llamado esmerilado ***entre centros***, para distinguirlo del esmerilado sin centros) se realiza en forma parecida a la operación de torneado. Las máquinas de esmerilar que se usan para estas operaciones se asemejan mucho a un torno, en el cual el portaherramientas ha sido remplazado por un motor de alta velocidad para mover la rueda de esmeril. La pieza de trabajo cilíndrica se hace girar entre los centros para proporcionar una velocidad superficial de 18 a 30 m/min (60 a 100 ft/min) [16], y la rueda de esmeril, que gira a 1 200-2 000 m/min (4 000-6 500 ft/min), se sujeta para realizar el corte. Existen dos tipos de movimiento de avance: avance transversal y corte profundo, como se muestra en la figura 25.10. En el avance transversal la rueda de esmeril avanza en dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo. El avance normal se fija dentro de un rango típico de 0.0075 a 0.075 mm (0.0003 a 0.003 in). Algunas veces se le da a la rueda o al trabajo un movimiento oscilante longitudinal para mejorar el acabado superficial. En el corte profundo, la rueda de esmeril avanza de manera radial dentro del trabajo. Las ruedas de esmerilado perfiladas usan este tipo de movimiento de avance.

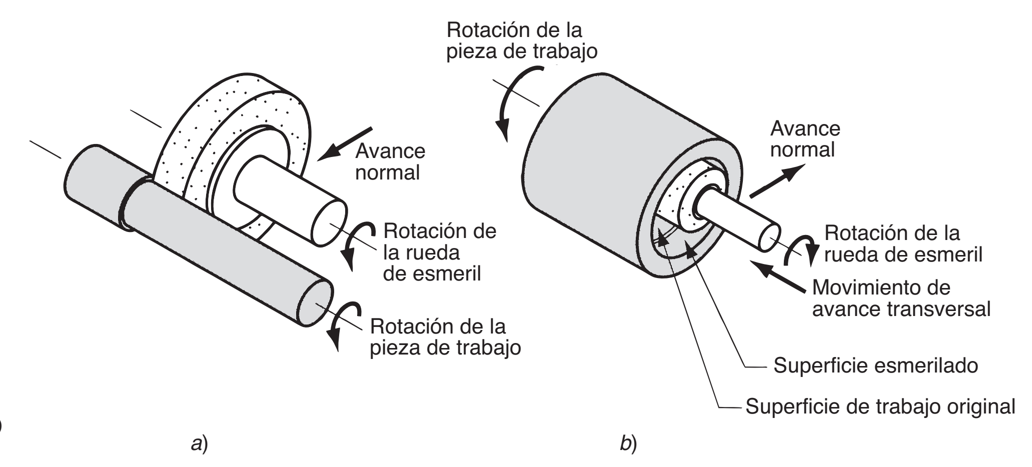


FIGURA 25.9 Dos tipos de esmerilado cilíndrico: *a*) exteriores y *b*) interiores.

El esmerilado cilíndrico externo se usa para terminar piezas que han sido maquinadas al tamaño aproximado y tratadas térmicamente para alcanzar la dureza deseada. Estas piezas incluyen ejes, cigüeñales, husillos, cojinetes, boquillas y rodillos para molinos laminadores. La operación de esmerilado produce el tamaño final y el acabado superficial requerido en estas piezas endurecidas.

El esmerilado ***cilíndrico interno*** opera en forma similar a la operación de torneado interno. La pieza de trabajo se sostiene por lo general en un mandril y se hace girar para obtener velocidades superficiales de 20 a 60 m/min (75 a 200 ft/min) [16]. Las velocidades superficiales de la rueda son similares a las del esmerilado cilíndrico externo. La rueda avanza en cualquiera de estas dos formas: avance transversal, figura 25.9*b*), y avance profundo. Obviamente, el diámetro de la rueda en el esmerilado cilíndrico interno debe ser más pequeño que el agujero perforado originalmente. Esto significa frecuentemente que el diámetro de la rueda es muy pequeño y, por lo tanto, se necesitan velocidades de rotación muy altas a fin de lograr la velocidad superficial deseada. El esmerilado interno se usa para acabar superficies internas endurecidas de guías de cojinetes y superficies de bujes.

Esmerilado sin centros El esmerilado sin centros es un proceso alternativo para esmerilar superficies cilíndricas internas y externas. Como su nombre lo indica, la pieza de trabajo no se sostiene entre los centros, lo cual produce una reducción del tiempo de manejo del trabajo. Por esta causa, el esmerilado sin centros se usa frecuentemente para trabajo de alta producción. El arreglo para el esmerilado ***externo sin centros*** (figura 25.11) consiste en dos ruedas: la rueda de esmeril y una rueda reguladora. Las piezas de trabajo, que

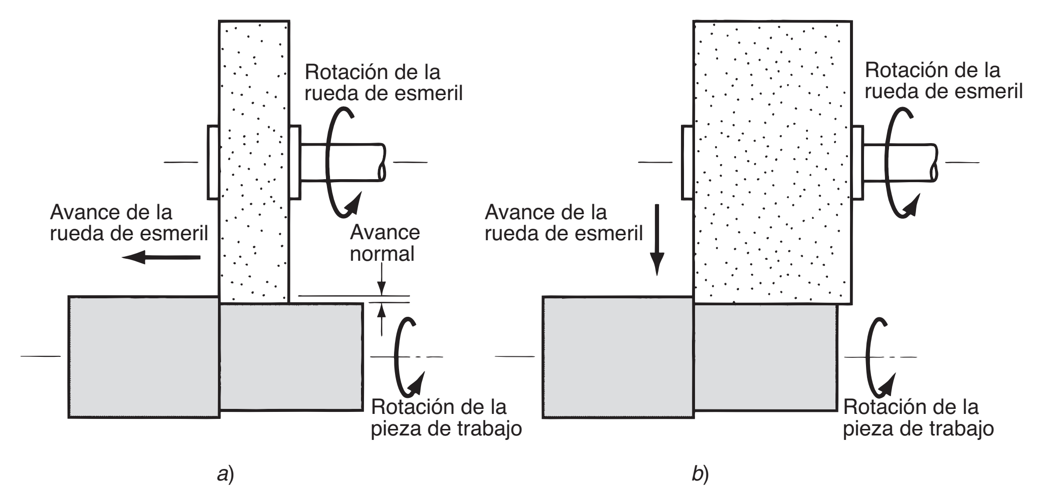


FIGURA 25.10 Dos tipos de movimientos de avance en esmerilado cilíndrico externo: *a*) avance transversal y *b*) corte profundo.

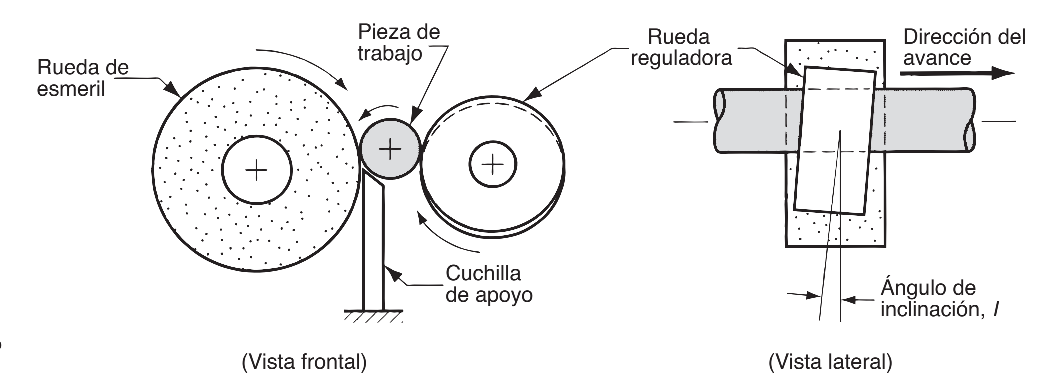


FIGURA 25.11 Esmerilado externo sin centros.

pueden ser muchas piezas cortas individuales de varias pulgadas de largo, o varias barras largas (por ejemplo de 3 o 4 m de largo), se sostienen mediante una cuchilla de apoyo y se alimentan a través de las dos ruedas. La rueda de esmeril hace el corte girando a una velocidad superficial de 1 200 a 1 800 m/min (4 000 a 6 000 ft/min). La rueda reguladora gira a velocidades mucho más bajas y está inclinada a un ángulo ligero I para controlar la alimentación del trabajo. La siguiente ecuación puede usarse para predecir la velocidad de alimentación, con base en un ángulo de inclinación y en otros parámetros del proceso [16]:

$$f_r = \pi D_r N_r \operatorname{sen} I \tag{25.11}$$

donde f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min); D_r = diámetro de la rueda reguladora, mm (in); N_r = velocidad de rotación de la rueda reguladora en rev/min; e I = ángulo de inclinación de la rueda reguladora.

El arreglo típico en el esmerilado ***interno sin centros*** se muestra en la figura 25.12. En lugar de la cuchilla de apoyo, se usan dos rodillos de soporte para mantener la posición del trabajo. La rueda reguladora se inclina en un pequeño ángulo para controlar el avance del trabajo que pasa enfrente de la rueda de esmeril. Debido a la necesidad de sostener la rueda de esmeril, no es posible el avance del trabajo como en el esmerilado externo sin centros. Por lo tanto, esta operación de esmerilado no puede lograrse a las mismas velocidades de alta producción que son posibles en el proceso externo sin centros. Su ventaja consiste en que es capaz de proporcionar una concentricidad muy estrecha entre los diámetros interno y externo de una pieza tubular, como las guías para un cojinete de rodillos.

Esmerilado de alta remoción de material Una forma relativamente nueva de esmerilado es el esmerilado de alta remoción de material, creado alrededor de 1958. El esmerilado de alta remoción se realiza a profundidades de corte muy altas y a velocidades de avance muy bajas. La comparación con el esmerilado convencional se ilustra en la figura 25.13.

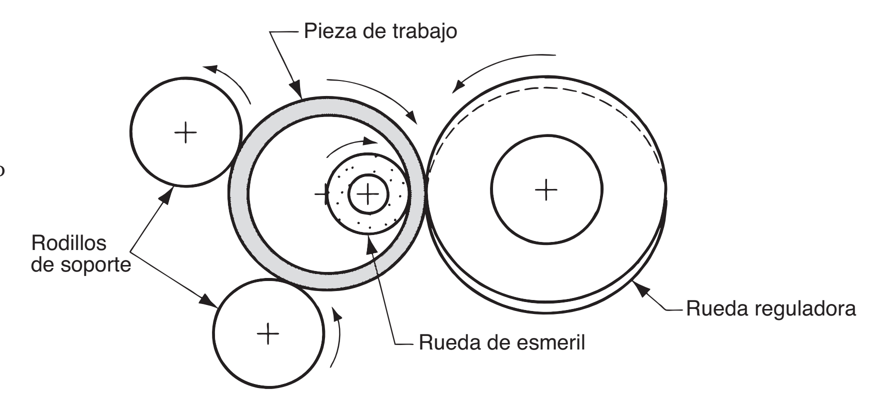


FIGURA 25.12 Esmerilado interno sin centros.

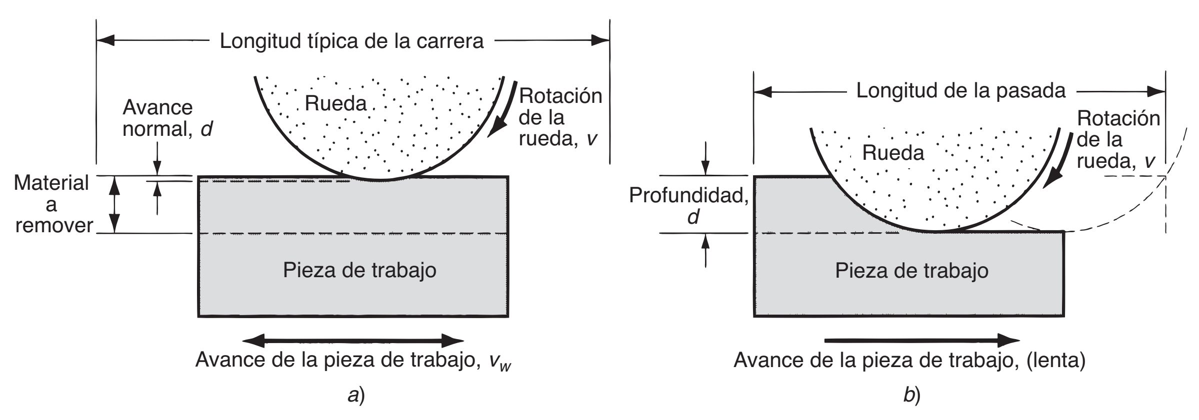


FIGURA 25.13 Comparación de *a*) esmerilado convencional y *b*) esmerilado de alta remoción de material.

Las profundidades de corte en el esmerilado de alta remoción son de 1 000 a 10 000 veces más grandes que en el esmerilado superficial convencional, y las velocidades de avance se reducen alrededor de la misma proporción. Sin embargo, la tasa de remoción del material y la productividad se incrementan debido a que la rueda corta de manera continua. Esto contrasta con el esmerilado convencional en el cual el movimiento oscilante del trabajo da como resultado una pérdida significativa de tiempo durante cada carrera.

El esmerilado de alta remoción puede aplicarse en el esmerilado de superficies planas y en el esmerilado cilíndrico externo. Las aplicaciones del esmerilado de superficies planas incluyen el esmerilado de ranuras y perfiles. El proceso parece especialmente apropiado para aquellos casos en los cuales la relación entre profundidad y ancho es relativamente grande. Las aplicaciones cilíndricas incluyen roscas, perfiles de engranes formados y otros componentes cilíndricos. El término esmerilado ***profundo*** se usa en Europa para describir estas aplicaciones del esmerilado cilíndrico externo con avance lento.

Se ha despertado un reciente interés en el esmerilado de alta remoción debido a la introducción de máquinas esmeriladoras diseñadas con características especiales para realizar este proceso. Dentro de estas características están [11] alta estabilidad estática y dinámica, correderas muy precisas con poca tendencia a atascarse, poder incrementado del husillo (dos a tres veces la potencia de las máquinas de esmerilado convencionales), mesas estables para avances lentos, sistemas de manejo de fluidos para esmerilado de alta presión, sistemas capaces de aderezar las ruedas de esmerilado durante el proceso. Las ventajas típicas del esmerilado de alta remoción incluyen: 1) altas tasas de remoción de material, 2) precisión mejorada para piezas contorneadas y 3) temperaturas reducidas en la superficie de trabajo.

Otras operaciones de esmerilado Es necesario mencionar otras operaciones de esmerilado para completar la revisión de esta sección. Se incluyen el afilado de herramientas, esmerilado de interiores vertical, esmeril de discos, rebabadores y bandas abrasivas.

Las herramientas de corte están hechas de acero endurecido y otros materiales duros. Las esmeriladoras ***de herramientas*** son máquinas de rectificar especiales, de varios diseños para afilar y reacondicionar las herramientas de corte. Estas máquinas tienen dispositivos que posicionan y orientan las herramientas durante el esmerilado de las superficies deseadas, a los ángulos y radios especificados. Algunas de las esmeriladoras de herramientas son de propósito general, mientras que otras tienen el único propósito de generar geometría de tipos específicos de herramienta. Las esmeriladoras de afilado de herramientas de propósito general usan aditamentos especiales y ajustes para acomodar una variedad de configuraciones geométricas de las herramientas. Las esmeriladoras de herramientas de propósito único incluyen afiladores para fresas de engranes, afiladores de fresas de varios tipos, afiladores de brocas y afiladores de punta de brocas.

Las esmeriladoras ***de interiores verticales*** son máquinas usadas tradicionalmente para rectificar agujeros con alta precisión en piezas de acero endurecido. Las aplicaciones

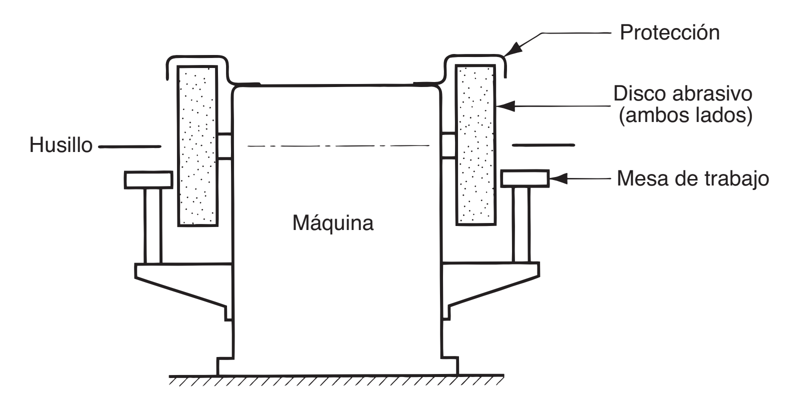


FIGURA 25.14 Configuración típica de un esmeril de discos.

originales incluyen matrices y troqueles. Aunque estas aplicaciones son todavía importantes, las esmeriladoras de interiores verticales se usan actualmente en un rango más amplio, donde se requiere alta precisión y buen acabado de componentes endurecidos. Hay máquinas de esmerilado interno vertical que disponen de controles numéricos para lograr una operación automatizada.

Los ***esmeriles de disco*** son máquinas esmeriladoras con discos abrasivos grandes montados en ambos extremos de un husillo horizontal, como se muestra en la figura 25.14. El trabajo se sostiene contra la superficie lateral plana de la rueda (en general, manualmente) para realizar la operación de esmerilado. Algunas máquinas esmeriladoras de disco tienen husillos opuestos dobles. Al ajustar los discos a la separación deseada, la pieza de trabajo puede avanzar en forma automática entre los dos discos y puede esmerilarse simultáneamente sobre los lados opuestos. Las ventajas del esmerilador de discos son una buena planicidad y paralelismo a velocidades altas de producción.

La configuración del ***rebabador*** es similar al esmeril de disco. La diferencia es que el esmerilado se hace en la periferia de la rueda más que en el lado plano de la rueda. Por lo tanto, el diseño de las ruedas de esmeril es diferente al de los esmeriladores de discos. El rebabado es generalmente una operación manual para operaciones de esmerilado de desbaste, tales como remover la rebaba de piezas fundidas, forjado y alisado de las juntas soldadas.

El ***esmerilado con bandas abrasivas*** usa partículas abrasivas pegadas a una banda flexible (tela). El arreglo típico se ilustra en la figura 25.15. El soporte de la banda se requiere cuando el trabajo se presiona contra ella; este soporte se consigue por medio de un rodillo o placa localizado atrás de la banda. Se usa una placa plana para trabajos que necesiten superficies planas. Se puede usar una placa suave si se quiere conformar la banda al contorno general de la pieza durante el esmerilado. La velocidad de la banda depende del material que se está esmerilando. El rango típico es de 750 a 1 700 m/min (2 500 a 5 500 ft/min). Debido a los mejoramientos en los abrasivos y en los materiales aglutinantes, cada vez se usan más bandas abrasivas para altas velocidades de remoción de material, en lugar del esmerilado ligero aplicado tradicionalmente. El término ***lijadora de banda*** se refiere a las aplicaciones ligeras del esmerilado, en las cuales la pieza de trabajo se presiona contra

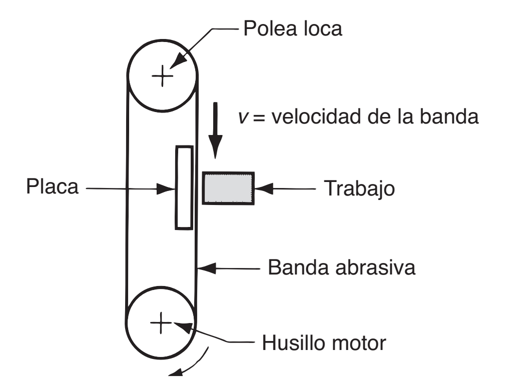


FIGURA 25.15 Esmerilador de banda abrasiva.

la banda para eliminación de rebabas y salientes, y también para producir un mejor acabado en forma rápida y manual.

25.2 PROCESOS ABRASIVOS RELACIONADOS

Otros procesos abrasivos incluyen el rectificado, el bruñido, el superacabado, el pulido y el abrillantado. Éstos se usan exclusivamente como operaciones de acabado. La forma inicial de la pieza se crea mediante algún otro proceso y se termina por medio de alguna de estas operaciones para obtener un acabado superficial superior. Las geometrías usuales de las piezas para estos procesos se indican en la tabla 25.6. Para efectos de comparación, también se presentan los datos correspondientes para el esmerilado.

Otra clase de operaciones de acabado, llamadas acabado en masa (sección 28.2.2), se usan para acabar piezas en forma colectiva más que individual. Estos métodos de acabado masivo se usan también para limpieza y eliminación de rebabas.

25.2.1 Rectificado

El ***rectificado*** es un proceso abrasivo ejecutado por un conjunto de barras abrasivas pegadas. Una aplicación común es el acabado de las perforaciones en los motores de combustión interna. Otras aplicaciones incluyen cojinetes, cilindros hidráulicos y cañones de pistolas. En estas aplicaciones se logran acabados superficiales cercanos a 0.12 μm (5 μ-in) o ligeramente menores. El rectificado produce una superficie cruzada transversal característica, que tiende a retener la lubricación durante la operación del componente, contribuyendo a su funcionamiento y vida de servicio.

El proceso de rectificado para una superficie cilíndrica interna se ilustra en la figura 25.16. La herramienta de rectificado consiste en un conjunto de barras abrasivas pegadas. Se usan cuatro barras sobre la herramienta que se muestra en la figura, pero su número depende del tamaño del agujero. Para agujeros pequeños (por ejemplo, cañones de pistola) se podrían usar de dos a cuatro barras, y para agujeros de diámetro más grande se podrían usar una docena o más. El movimiento de la herramienta de rectificado es una combinación de rotación y oscilación lineal, regulada de tal manera que un punto dado de la barra abrasiva no repite la misma trayectoria. Este movimiento bien complejo produce el patrón cruzado transversal sobre la superficie del barreno. Las velocidades de rectificado están entre 15 y 150 m/min (50 y 500 ft/min) [4]. Durante este proceso las barras abrasivas presionan hacia afuera contra la superficie del barreno para producir la acción de corte abrasiva deseada. Son típicas las presiones de rectificado de 1 a 3 MPa (150 a 450 lb/in^2), aunque se han reportado presiones fuera de este rango [4]. La herramienta de rectificado se sostiene en el orificio mediante dos juntas universales, lo que ocasiona que la herramienta siga el eje previamente definido del orificio. El rectificado agranda y termina la perforación, pero no puede cambiar su localización.

En el rectificado, el tamaño de los granos fluctúa entre 30 y 600. Tanto en el rectificado como en el esmerilado existe la misma relación entre mejor acabado y velocidades

TABLA 25.6 Geometría usual de las piezas para rectificado, bruñido, superacabado, pulido y abrillantado.

Proceso	Geometría usual de la pieza	Rugosidad superficial μm	Rugosidad superficial μ-in
Esmerilado, tamaño de grano medio	Plana, cilíndrica externa, agujeros redondos	04-1.6	16-63
Esmerilado, tamaño de grano fino	Plana, cilíndrica externa, agujeros redondos	0.2-0.4	8-16
Rectificado	Agujero redondo (por ejemplo, perforación de motor)	0.1-0.8	4-32
Bruñido	Plana o ligeramente esférica (por ejemplo, lentes)	0.025-0.4	1-16
Superacabado	Superficie plana, cilíndrica externa	0.013-0.2	0.5-8
Pulimentado	Formas diversas	0.025-0.8	1-32
Abrillantado	Formas diversas	0.013-0.4	0.5-16

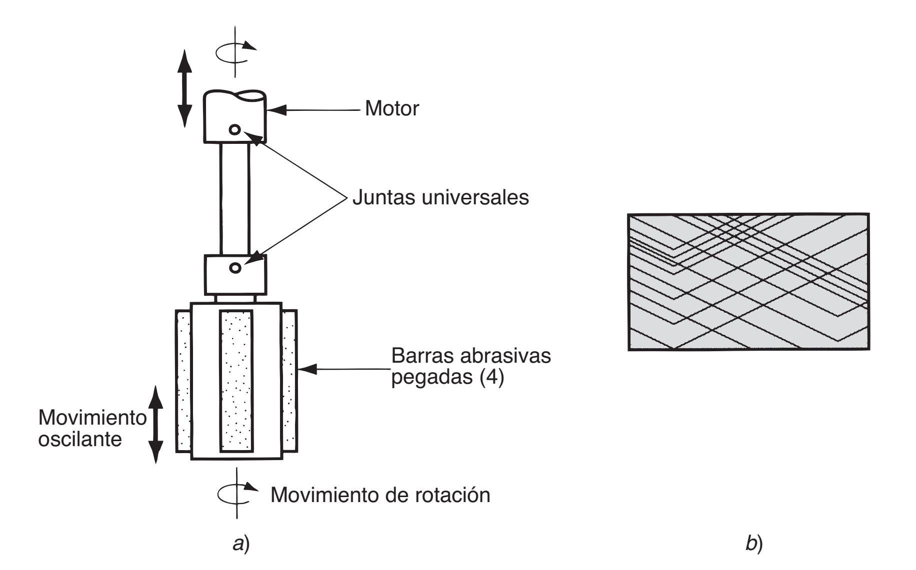


FIGURA 25.16 El proceso de rectificado: *a*) la herramienta de rectificado que se usa para la superficie interna de una perforación y *b*) patrón cruzado transversal creado mediante la herramienta de rectificado.

de remoción de material más altas. La cantidad de material removido de la superficie de trabajo durante una operación de rectificado puede ser de hasta 0.5 mm (0.020 in), pero generalmente es mucho menor que esto. En el rectificado, es necesario usar un fluido de corte con el fin de enfriar y lubricar la herramienta y para ayudar a remover las virutas.

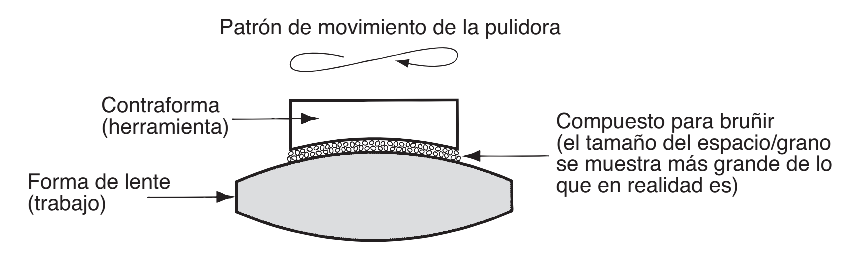
25.2.2 Bruñido

El bruñido es un proceso abrasivo que se usa para producir acabados superficiales de extrema precisión y tersura. Se usa en la producción de lentes ópticos, superficies metálicas para cojinetes, calibradores y otras piezas que requieren acabados muy buenos. Con frecuencia, se bruñen las piezas metálicas que están sujetas a cargas y fatiga o superficies que se usan para formar un sello con una pieza complementaria.

En lugar de una herramienta abrasiva, en el bruñido se usa una suspensión de partículas abrasivas muy pequeñas mezcladas en un fluido entre la pieza de trabajo y la herramienta de bruñir. En la figura 25.17 se ilustra la aplicación del proceso en la fabricación de lentes. Al fluido con abrasivos se le llama ***compuesto para bruñir*** y tiene la apariencia general de una pasta calcárea. Los fluidos que se usan para hacer el compuesto son aceites y queroseno. Los abrasivos comunes son óxido de aluminio y carburo de silicio con tamaños de grano típicos entre 300 y 600. La herramienta para bruñido se llama ***contraforma*** y tiene exactamente la contraforma de la forma deseada en la pieza de trabajo. Para realizar el proceso, la contraforma se presiona contra el trabajo y se mueve hacia atrás y adelante sobre la superficie en forma de un ocho u otro patrón de movimiento, sujetando todas las porciones de la superficie a la misma acción. El bruñido se hace algunas veces a mano, pero las máquinas bruñidoras realizan el proceso con mayor consistencia y eficiencia.

Los materiales que se usan para la contraforma van desde acero y fundición de hierro hasta cobre o plomo. Se han hecho ruedas contraforma de madera. Dado que se usa un compuesto de pulido en lugar de una herramienta abrasiva pegada, el mecanismo de este proceso es de alguna forma diferente al esmerilado. Se cree que existen dos mecanismos

FIGURA 25.17 El proceso de bruñir en la elaboración de lentes.



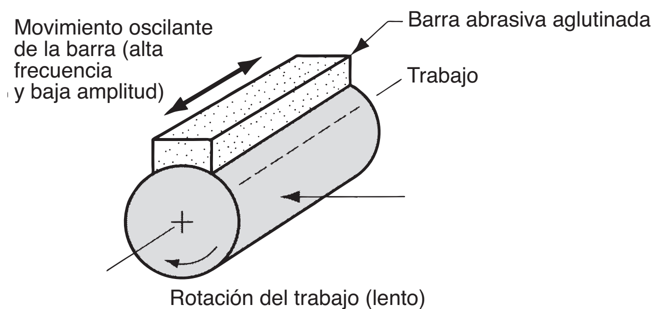


FIGURA 25.18
Superacabado de una superficie cilíndrica externa.

alternativos de corte en el bruñido [4]. En el primer mecanismo, las partículas abrasivas ruedan y se deslizan entre la rueda de bruñido y el trabajo, y ocurre muy poca acción de corte en ambas superficies. En el segundo mecanismo, los abrasivos quedan incorporados en la superficie de la contraforma y la acción de corte es muy similar al esmerilado. Lo más probable es que el bruñido sea una combinación de estos dos mecanismos, dependiendo de la dureza relativa del trabajo y de la contraforma. Para contraformas de materiales suaves, el mecanismo de incorporación de granos es el dominante y para contraformas duras, domina el rodado y el deslizado.

25.2.3 Superacabado

El superacabado es un proceso abrasivo similar al lapeado. Ambos procesos usan una barra con abrasivo pegado, la cual se mueve mediante una acción oscilante y de compresión contra la superficie que se trabaja. El superacabado difiere del bruñido en los siguientes aspectos [4]: 1) los recorridos son más cortos, 5 mm (3/16 in); 2) se usan frecuencias más altas (hasta 1 500 recorridos por minuto); 3) se aplican presiones más bajas entre la herramienta y la superficie, debajo de 0.28 MPa (40 lb/in^2); 4) las velocidades de la pieza de trabajo son más bajas 15 m/min (50 ft/min) o menos; y 5) los tamaños de granos son generalmente menores. El movimiento relativo entre la barra abrasiva y la superficie de trabajo es variado, de manera que los granos individuales no recorren la misma trayectoria. Se usa un fluido de corte para enfriar la superficie del trabajo y eliminar las virutas. Además, el fluido tiende a separar la barra abrasiva de la superficie de trabajo después de que se alcanza un cierto nivel de tersura en las superficies; de esta forma se previene una acción posterior de corte. El resultado de estas condiciones de operación son acabados similares al de un espejo con valores en la rugosidad superficial cercanos a 0.025 μm (1 μ-in). El superacabado puede usarse para superficies planas y cilíndricas externas. El proceso se ilustra en la figura 25.18 para estas últimas geometrías.

25.2.4 Pulimentado y abrillantado

El ***pulimentado*** se usa para remover arañazos y rebabas y para alisar las superficies gruesas por medio de granos abrasivos pegados a una rueda de pulimentado que gira a altas velocidades, alrededor de 2 300 m/min (7 500 ft/min). Las ruedas se hacen de lona, cuero, fieltro e incluso papel; así, estas ruedas son un tanto flexibles. Los granos abrasivos se pegan en la periferia de la rueda. Cuando se gastan los abrasivos, se le vuelven a pegar a la rueda nuevos granos. El tamaño de los granos es de 20 a 80 para pulimentado basto y de 90 a 120 para pulimentado fino, y arriba de 120 para acabados más finos. A menudo, las operaciones de pulimentado se realizan a mano.

El ***abrillantado*** es similar en apariencia al pulimentado, pero su función es diferente. El abrillantado se usa para producir superficies atractivas de alto lustre. Las ruedas de abrillantado se hacen de materiales similares a las ruedas de pulido (cuero, fieltro, algodón,

etcétera) pero las ruedas de abrillantado por lo general son más suaves. Los abrasivos son muy finos y están contenidos en un compuesto de abrillantado que se presiona en la superficie externa de la rueda mientras gira. Esto contrasta con el pulimentado, en el cual los granos de abrasivos están pegados a la superficie de la rueda. Las partículas abrasivas deben reponerse periódicamente como en el pulimentado. El abrillantado se hace por lo general manualmente, como en el pulimentado, aunque se han diseñado máquinas para realizar el proceso de manera automática. Las velocidades están entre 2 400 y 5 200 m/min (8 000 y 17 000 ft/min).

REFERENCIAS

[1] Aronson, R. B., "More Than a Pretty Finish", ***Manufacturing Engineering***, febrero de 2005, pp. 57-69.
[2] Andrew, C., Howes, T. D. y Pearce, T. R. A., ***Creep Feed Grinding***, Holt, Rinehart and Winston, Ltd., Londres, 1985.
[3] ***ANSI Standard B74.13-1977***, "Markings for Identifying Grinding Wheels and Other Bonded Abrasives", American National Standards Institute, Nueva York, 1977.
[4] Armarego, E. J. A. y Brown, R. H., ***The Machining of Metals***, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1969.
[5] Bacher, W. R. y Merchant, M. E., "On the Basic Mechanics of the Grinding Process", ***Transactions ASME***, Serie B, vol. 80, núm. 1, 1958, pp. 141.
[6] Black, P. H., ***Theory of Metal Cutting***, McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1961.
[7] Boothroyd, G. y Knight, W. A., ***Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools***, 2a. ed., Marcel Dekker. Inc., Nueva York, 1989.
[8] Boston, O. W., ***Metal Processing***, 2a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1951.
[9] Cook, N. H., ***Manufacturing Analysis***, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1966.
[10] DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R. A., ***Materials and Processes in Manufacturing***, 9a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York. 2003.
[11] Drozda, T. J. y Wick. C. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. I. ***Machining***, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1983.
[12] Eary, D. F. y Johnson. G. E., ***Process Engineering for Manufacturing***, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1962.
[13] Kaiser, R., "The Facts about Grinding", ***Manufacturing Engineering***, vol. 125, núm. 3, septiembre de 2000, pp. 78-85.
[14] Krabacher, E. J., "Factors Influencing the Performance of Grinding Wheels", ***Transactions ASME***, Serie B, vol. 81, núm. 3, 1959, pp. 187-199.
[15] Krar, S. F., ***Grinding Technology***, 2da. ed., Delmar Publishers, 1995.
[16] ***Machining Data Handbook***, 3a. ed., vol. I y II. Metcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio, 1980.
[17] Malkin, S., ***Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives***, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1996.
[18] Phillips, D., "Creeping Up", ***Cutting Tool Engineering***, vol. 52, núm. 3, marzo de 2000, pp. 32-43.
[19] Salmon, S., "Creep-Feed Grinding Is Surprisingly Versatile." ***Manufacturing Engineering***, noviembre de 2004, pp. 59-64.

PREGUNTAS DE REPASO

25.1 ¿Por qué los procesos abrasivos son tecnológica y comercialmente importantes?

25.2 ¿Cuáles son los cinco parámetros principales de una rueda de esmerilado?

25.3 ¿Cuáles son algunos de los materiales abrasivos que se usan en la rueda de esmerilado?

25.4 Mencione algunos de los principales materiales aglutinantes que se usan en las ruedas de esmerilado.

25.5 ¿Qué es la estructura de la rueda?

25.6 ¿Qué es la dureza de la rueda de esmeril?

25.7 ¿Por qué los valores de la energía específica son mucho más altos en el esmerilado que en los procesos tradicionales de maquinado como el fresado?

25.8 El esmerilado crea altas temperaturas. ¿De qué manera resulta dañina la temperatura en este proceso?

25.9 ¿Cuáles son los tres mecanismos de desgaste de las ruedas de esmeril?

25.10 ¿Qué es la operación llamada aderezado, con referencia a las ruedas de esmerilado?

25.11 ¿Qué es el formado en relación con las ruedas de esmerilado?

25.12 ¿Qué materiales abrasivos se seleccionan para afilar una herramienta de corte de carburo cementado?

25.13 ¿Cuáles son las funciones de un fluido de esmerilado?
25.14 ¿Qué es el esmerilado sin centros?
25.15 ¿En qué difiere el esmerilado de alta remoción del esmerilado convencional?
25.16 ¿En qué difiere el esmerilado con bandas abrasivas de las operaciones de esmerilado de superficies planas?
25.17 Mencione algunas de las operaciones abrasivas de que se dispone para lograr muy buenos acabados superficiales.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 16 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea la calificación se reduce un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de la calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

25.1. ¿Cuál de los siguientes procesos de maquinado convencional está más cercano al esmerilado? *a*) taladrado, *b*) fresado, *c*) cepillado o *d*) torneado.

25.2. De los siguientes materiales abrasivos, ¿cuál es el que tiene la dureza más alta? *a*) óxido de aluminio, *b*) nitruro de boro cúbico, *c*) diamante o *d*) carburo de silicio.

25.3. ¿Cuál de los siguientes efectos tiende a provocar el tamaño de grano más pequeño en una rueda de esmeril? *a*) degradar el acabado superficial, *b*) no tiene efecto en el acabado superficial o *c*) mejorar el acabado superficial.

25.4. ¿Cuál de las siguientes opciones proporcionaría velocidades más altas de remoción de material? *a*) tamaño más grande de grano o *b*) tamaño más pequeño de grano.

25.5. ¿Cuál de las siguientes opciones mejora el acabado superficial en el esmerilado? (tres de las respuestas posibles son las mejores): *a*) estructura más densa de la rueda, *b*) mayor velocidad de la rueda, *c*) velocidades del trabajo más altas, *d*) mayor avance normal, *e*) menor avance normal, *f*) menor velocidad de la rueda, *g*) menor velocidad del trabajo y *h*) estructura más abierta de la rueda.

25.6. ¿Cuál de los siguientes materiales abrasivos es el más apropiado para esmerilado de acero y hierro fundido?: *a*) óxido de aluminio, *b*) nitruro de boro cúbico, *c*) diamante o *d*) carburo de silicio.

25.7. ¿Cuál de los siguientes materiales abrasivos es el más apropiado para esmerilado acero de herramienta endurecido?: *a*) óxido de aluminio, *b*) nitruro de boro cúbico, *c*) diamante o *d*) carburo de silicio.

25.8. ¿Cuál de los siguientes materiales abrasivos es el más apropiado para esmerilado de metales no ferrosos?: *a*) óxido de aluminio, *b*) nitruro de boro cúbico, *c*) diamante, *d*) carburo de silicio.

25.9. ¿Cuál de las siguientes opciones ayuda a reducir la incidencia del daño por calor en la superficie de trabajo en esmerilado? (hay cuatro respuestas correctas) *a*) labrado o rectificado frecuente de la rueda, *b*) mayor avance normal, *c*) velocidades de rueda más altas, *d*) velocidades del trabajo más altas, *e*) menor avance normal, *f*) velocidades de la rueda más bajas, *g*) velocidades del trabajo más bajas.

25.10. ¿Con cuál de los siguientes procesos abrasivos se logra el mejor acabado superficial?: *a*) esmerilado sin centros, *b*) bruñido, *c*) pulido o *d*) superacabado.

25.11. ¿El término esmerilado de alta remoción se refiere a cuál de las siguientes descripciones? *a*) nombre alternativo de cualquier operación de esmerilado de alta remoción, *b*) esmerilado de alta remoción cilíndrico externo, *c*) operación de esmerilado ejecutado en el fondo de un agujero, *d*) esmerilado de superficies que usa un avance transversal grande, *e*) esmerilado de superficies que usa un avance normal grande.

PROBLEMAS

25.1. En cierta operación de esmerilado de superficies el diámetro de la rueda = 150 mm y el avance normal = 0.07 mm. La velocidad de la rueda = 1 450 m/min, la velocidad del trabajo = 0.25 m/s y el avance transversal = 5 mm. El número de granos activos por área de la superficie de la rueda = 0.75 granos/mm^2. Determine *a*) la longitud promedio por viruta, *b*) la velocidad de remoción de metal y *c*) el número de virutas formadas por unidad de tiempo para la porción de la operación cuando la rueda está trabajando.

25.2. Las siguientes condiciones y configuraciones se usan en cierta operación de esmerilado de superficies: diámetro de la rueda = 6.0 in, velocidad de la rueda = 4 750 ft/min, velocidad del trabajo = 50 ft/min y el avance transversal = 0.20 in. El número de granos activos por pulgada cuadrada de la superficie de la rueda = 500. Determine *a*) la longitud promedio por viruta, *b*) la velocidad de remoción de metal y *c*) el número de virutas formadas por unidad de tiempo para la porción de la operación cuando la rueda está trabajando.

25.3 Se usa una operación de esmerilado cilíndrico para acabar el interior de un orificio desde un diámetro inicial de 250.00 mm hasta un diámetro final de 252.5 mm. El orificio tiene una longitud de 125 mm. Se usa una rueda de esmerilado con un diámetro inicial de 150.00 mm y una anchura de 20.0 mm. Después de la operación, el diámetro de la rueda de

esmeril se ha reducido a 149.75 mm. Determine la relación de esmerilado en esta operación.

25.4 En una operación de esmerilado superficial que se realiza sobre una pieza plana de acero al carbono endurecido, la rueda de esmeril tiene un diámetro = 200 mm y una anchura de 25 mm. La rueda gira a 2 400 rev/min, con una profundidad de corte (avance normal) = 0.05 mm/paso y un avance transversal = 3.50 mm. La velocidad oscilante del trabajo es de 6 m/min y la operación se ejecuta en seco. Determine *a*) la longitud del contacto entre la rueda y el trabajo y *b*) la velocidad del volumen de metal removido. *c*) Si hay 64 granos activos/cm^2 en la superficie de la rueda, estime el número de virutas formadas por unidad de tiempo. *d*) ¿Cuál es el volumen promedio por viruta? *e*) Si la fuerza cortante tangencial sobre el trabajo = 30 N, calcule la energía específica en esta operación.

25.5. Se usa una rueda de esmeril de 8 in de diámetro y 1.0 in de ancho en el esmerilado de cierta superficie en un trabajo sobre una pieza plana de acero 4340 tratado térmicamente. La rueda gira para alcanzar 5 000 ft/min, con una profundidad de corte (avance normal) = 0.002 in por paso y un avance transversal = 0.15 in. La velocidad oscilante del trabajo es = 20 ft/min y la operación se ejecuta en seco. *a*) ¿Cuál es la longitud de contacto entre la rueda y el trabajo?, *b*) ¿cuál es la velocidad del volumen del material removido? *c*) Si hay 300 granos activos/in^2 en la superficie de la rueda, estime el número de virutas formadas por unidad de tiempo, *d*) ¿Cuál es el volumen promedio por viruta? *e*) Si la fuerza de corte tangencial sobre la pieza de trabajo = 10 lbs, ¿cuál es la energía específica calculada para este trabajo?

25.6. Se ejecuta una operación de esmerilado de superficies sobre una pieza de trabajo de acero 6150 (con dureza aproximada de 200 BHN). La designación de la rueda de esmeril es C-24-D-5-V. La rueda tiene 7.0 in de diámetro, 1.00 in de ancho y opera con una velocidad rotacional de 3 000 rev/min. La profundidad (avance normal) = 0.002 in por paso y el avance transversal = 0.5 in. La velocidad de la pieza de trabajo = 20 ft/min. Esta operación ha sido una fuente de problemas casi desde el principio. El acabado superficial no es tan bueno como las 16 μ-in que se especifican en la etiqueta de la pieza y hay señales de daño metalúrgico en la superficie. Además, la rueda parece saturarse casi tan pronto como empieza la operación. En resumen, casi siempre las cosas han salido mal desde el principio. *a*) Determine la velocidad de remoción de metal cuando la rueda está trabajando, *b*) si el número de granos activos por pulgada cuadrada = 200, determine la longitud promedio de las virutas y el número de ellas formadas por unidad de tiempo, *c*) ¿qué cambios recomendaría usted en la rueda de esmeril para ayudar a resolver los problemas que se han encontrado? Explique las razones de cada recomendación.

25.7. En cierta operación de esmerilado sin centros, la rueda de esmeril tiene 200 mm de diámetro y la rueda reguladora tiene 125 mm de diámetro. La rueda de esmeril gira a 3 000 rev/min y la rueda reguladora lo hace a 200 rev/min. El ángulo de inclinación de la rueda reguladora = 2.5°. Determine la velocidad de avance de las piezas de trabajo cilíndricas que tienen 25.0 mm de diámetro y 175 mm de largo.

25.8. Una operación de esmerilado sin centros usa una rueda reguladora de 150 mm de diámetro, con una velocidad de rotación = 500 rev/min. ¿A qué ángulo de inclinación debe colocarse la rueda reguladora si se desea alimentar una pieza de trabajo de 3.5 m de largo y 18 mm de diámetro a través de la operación en exactamente 45 segundos?

25.9. En cierta operación de esmerilado sin centros, la rueda de esmeril tiene 8.5 in de diámetro y la rueda reguladora tiene 5.0 in de diámetro. La rueda de esmeril gira a 3 500 rev/min y la rueda reguladora gira a 150 rev/min. El ángulo de inclinación de la rueda reguladora = 3°. Determine la velocidad de avance de piezas cilíndricas que tienen 1.25 in de diámetro y 8.0 in de largo?

25.10. Se desea comparar las duraciones del ciclo requerido para esmerilado de una pieza de trabajo particular usando el esmerilado superficies de tradicional y el esmerilado de alta remoción. La pieza de trabajo tiene 200 mm de largo, 30 mm de ancho y 75 mm de espesor. Para hacer una buena comparación, la rueda de esmeril en ambos casos tiene 250 mm de diámetro, 35 mm de ancho y gira a 1 500 rev/min. Se desea remover 25 mm de material de la superficie. Cuando se usa el esmerilado tradicional, el avance normal se ajusta a 0.025 mm y la rueda atraviesa dos veces (hacia adelante y hacia atrás) a través de la superficie del trabajo en cada paso antes de reajustar el avance normal. No hay avance transversal porque el ancho de la rueda es mayor que el ancho del trabajo. Cada paso se hace a una velocidad de trabajo de 12 m/min, pero la rueda sobrepasa la pieza en ambos lados. Con aceleración y desaceleración, la rueda trabaja 50% del tiempo en cada paso. Cuando se usa el esmerilado de alta remoción, la profundidad se incrementa en 1000 y el avance hacia adelante disminuye en 1000. ¿Cuánto tiempo se requiere para completar la operación de esmerilado? *a*) con esmerilado tradicional y *b*) con esmerilado de alta remoción.

25.11 En cierta operación de esmerilado, el grado de la rueda de esmeril debería ser "M" (medio), pero sólo se dispone de una rueda de grado "T" (duro). Se desea hacer que la rueda parezca más suave haciendo cambios en las condiciones de corte. ¿Qué cambios recomendaría usted?

25.12. Se esmerila una aleación de aluminio en una operación de esmerilado cilíndrico externo para obtener un buen acabado superficial. Especifique los parámetros adecuados de la rueda de esmeril y las condiciones de esmerilado para este trabajo.

25.13. Se reafila un escariador (endurecido) de acero de alta velocidad para lograr un buen acabado. Especifique los parámetros adecuados de la rueda de esmeril para este trabajo.

25.14 Con base en las ecuaciones del texto, obtenga una ecuación para calcular el volumen promedio por viruta formada en el proceso de esmerilado.

26 PROCESO DE MAQUINADO NO TRADICIONAL Y DE CORTE TÉRMICO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los procesos de maquinado convencionales (por ejemplo, el torneado, el taladrado y el fresado) usan una herramienta de corte afilada para formar una viruta en un trabajo mediante una deformación cortante. Además de estos métodos convencionales, existe un grupo de procesos que usa otros mecanismos para remover materiales. El término ***maquinado no tradicional*** se refiere a este grupo de procesos, los cuales remueven el exceso de material mediante diversas técnicas que incluyen la energía mecánica, térmica, eléctrica o química (o combinaciones de ellas). Estos procesos no usan un instrumento afilado de corte en el sentido convencional.

Desde la Segunda Guerra Mundial se han desarrollado procesos no tradicionales, como respuesta a las necesidades nuevas y específicas que no pueden satisfacerse mediante

métodos convencionales. Estas necesidades y la importancia comercial y tecnológica resultante de los procesos no tradicionales incluyen:

- La necesidad de maquinar metales y no metales de reciente creación. Con frecuencia, estos materiales nuevos tienen propiedades especiales (por ejemplo: resistencia, tenacidad y alta dureza) que dificultan o imposibilitan su maquinado mediante métodos convencionales.
- La necesidad de obtener geometrías de piezas inusuales o complejas que no se obtienen con facilidad y que, en algunos casos, son imposibles de lograr mediante maquinado convencional.
- La necesidad de evitar daños externos en una pieza, lo cual sucede frecuentemente por los esfuerzos que surgen por el maquinado convencional.

Muchas de estas necesidades están asociadas con las industrias aeroespacial y electrónica, las cuales se han desarrollado en forma significativa durante las recientes décadas.

Existen literalmente docenas de procesos de maquinado no tradicionales y gran parte de ellos son únicos en su rango de aplicaciones. En este capítulo se analizarán los de mayor importancia comercial. Varias de las referencias bibliográficas de este libro contienen análisis más detallados de estos métodos no tradicionales.

A menudo, los procesos no tradicionales se clasifican de acuerdo con la forma principal de energía que usan para la remoción de materiales. En esta clasificación hay cuatro tipos:

1. ***Mecánicos***. En estos procesos no tradicionales se utiliza energía mecánica en alguna forma diferente a la acción de una herramienta de corte convencional. La forma típica de acción mecánica en estos procesos es la erosión del trabajo mediante un chorro a alta velocidad de abrasivos o fluidos (o ambos).
2. ***Eléctricos.*** Estos procesos no tradicionales usan energía electroquímica para la remoción de material; el mecanismo es lo opuesto al de galvanoplastia.
3. ***Térmicos.*** Estos procesos usan energía térmica para cortar o dar forma a una pieza de trabajo. Por lo general se aplica energía térmica a una parte muy pequeña de la superficie de trabajo, lo que provoca que esa parte se remueva por fusión o vaporización del material. La energía térmica se genera mediante la conversión de energía eléctrica en energía térmica.
4. ***Químicos.*** La mayoría de los materiales (en particular los metales) son susceptibles de ataques químicos por medio de ciertos ácidos y otras sustancias. En el maquinado químico, las sustancias seleccionadas remueven material de ciertas porciones de la pieza de trabajo, mientras que otras porciones de la superficie se protegen con una máscara.

26.1 PROCESOS DE ENERGÍA MECÁNICA

En esta sección se examinarán varios de los procesos no tradicionales de energía mecánica: 1) el maquinado ultrasónico, 2) el corte con chorro de agua, 3) el corte con chorro de agua abrasiva y 4) el maquinado con chorro abrasivo.

26.1.1 Maquinado ultrasónico

El ***maquinado ultrasónico*** (USM, por sus siglas en inglés) es un proceso de maquinado no tradicional en el cual se utilizan abrasivos a alta velocidad contenidos en una pasta fluida sobre un trabajo, mediante una herramienta vibratoria en amplitud baja, alrededor de 0.075 mm (0.003 in) y en una alta frecuencia, aproximadamente 20 000 Hz. La herramienta oscila en una dirección perpendicular a la superficie de trabajo y avanza lentamente hacia el trabajo para que la pieza adopte la forma deseada. Sin embargo, la acción de los abrasivos

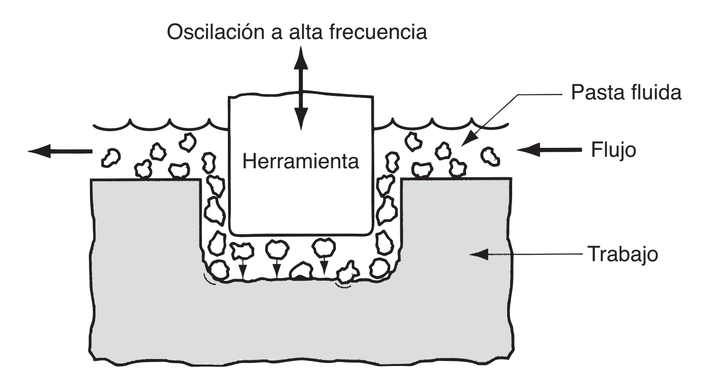


FIGURA 26.1 Maquinado ultrasónico.

es lo que ejecuta el corte, al chocar contra la superficie de trabajo. El arreglo general del proceso de USM se muestra en la figura 26.1.

Los materiales de herramienta comunes que se usan en el USM incluyen el acero suave y el acero inoxidable. Los materiales abrasivos incluyen el nitrato de boro, el carburo de boro, el óxido de aluminio, el carburo de silicio y el diamante. El tamaño de los granos (sección 16.1.1) varía entre 100 y 2 000. La amplitud de vibración debe establecerse aproximadamente igual al tamaño del grano y el tamaño del espaciamiento debe mantenerse en alrededor de dos veces el del grano. En un grado significativo, el tamaño del grano determina el acabado superficial en la nueva superficie de trabajo.

Además del acabado superficial, la velocidad de remoción de materiales es una importante variable de rendimiento en el maquinado ultrasónico. Para determinado material de trabajo, la velocidad de remoción en el USM aumenta, al incrementar la frecuencia y la amplitud de vibración, como se muestra en la figura 26.2.

La acción de corte en el USM afecta tanto a la herramienta como al trabajo. Conforme las partículas abrasivas erosionan la superficie de trabajo, también desgastan la herramienta y afectan su forma. Por lo tanto, es importante conocer los volúmenes relativos que se remueven del material de trabajo y de la herramienta durante el proceso, de manera semejante a la relación de esmerilado (sección 25.1.2). Esta relación de materia prima removida por desgaste de la herramienta varía para los diferentes materiales de trabajo, en proporciones que van desde 100:1 para cortar vidrio, hasta 1:1 para cortar acero de herramienta.

La pasta fluida en el USM consiste en una mezcla de agua y partículas abrasivas. La concentración de abrasivos en el agua varía de 20% a 60% [5]. La pasta debe circular en forma continua para que entren en acción los granos frescos en el espaciamiento entre la herramienta y el trabajo. También sirve para retirar las rebabas y los restos de esmeril producidos por el proceso de corte.

El maquinado ultrasónico se creó por la necesidad de maquinar materiales de trabajo duros y frágiles, tales como la cerámica, el vidrio y los carburos. También se usa con éxito sobre ciertos materiales, tales como el acero inoxidable y el titanio. Las formas que se obtienen mediante el USM incluyen orificios no redondeados, orificios a lo largo de un eje curvo y operaciones de acuñado, en las cuales se imparte un patrón de imágenes en la herramienta para una superficie de trabajo plana.

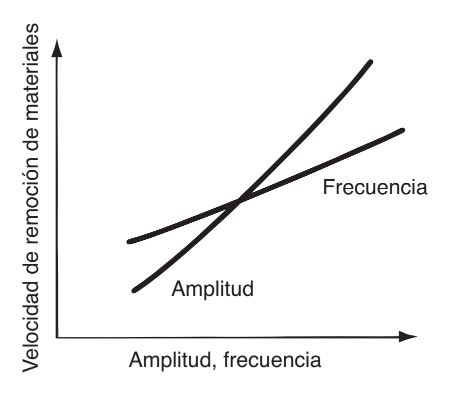


FIGURA 26.2 Efecto de la frecuencia de oscilación y la amplitud sobre la velocidad de remoción de materiales en el maquinado ultrasónico.

26.1.2 Procesos con chorro de agua y chorro abrasivo

Los procesos descritos en esta sección remueven material mediante chorros de agua a alta velocidad, chorros abrasivos o una combinación de ambos.

Corte con chorro de agua El ***corte con chorro de agua*** (WJC, por sus siglas en inglés) usa una corriente fina de agua a alta presión y velocidad dirigida hacia la superficie de trabajo para producir un corte, como se ilustra en la figura 26.3. Para este proceso también se emplea el nombre ***maquinado hidrodinámico***, pero el término de uso más frecuente en la industria parece ser corte con chorro de agua.

Para obtener un chorro fino de agua, se usa una pequeña abertura de boquilla con un diámetro de 0.1 a 0.4 mm (0.004 a 0.016 in). Para proporcionar al chorro una energía suficiente para poder cortar, se usan presiones hasta de 400 MPa (60 000 lb/in^2) y el chorro alcanza velocidades hasta de 900 m/s (3 000 ft/s). Una bomba hidráulica presuriza el fluido al nivel deseado. La unidad de boquilla consiste en un soporte hecho de acero inoxidable y una boquilla de zafiro, rubí o diamante. El diamante dura más, pero es el más costoso. En el WJC deben usarse sistemas de filtración para separar las rebabas producidas durante el corte.

Los fluidos de corte en el WJC son soluciones de polímeros, las cuales se prefieren debido a que tienden a producir un chorro consistente. Ya se han analizado los fluidos de corte en el contexto del maquinado convencional (sección 23.4), pero el término se usa de manera más adecuada en el WJC.

Los parámetros de proceso importantes en el WJC incluyen la distancia de separación, el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la velocidad de avance del corte. En la figura 26.3, la ***distancia de separación*** es la distancia entre la boquilla y la superficie de trabajo. En general, se prefiere que esta distancia sea mínima para reducir la dispersión del chorro de fluido antes de que golpee la superficie. Una distancia de separación normal es de 3.2 mm (0.125 in). El tamaño del orificio de la boquilla afecta la precisión del corte; las aberturas más pequeñas se usan para cortes más finos sobre materiales más delgados. Para cortar materia prima más gruesa se requieren chorros de fluido más densos y mayores presiones. La velocidad de avance del corte se refiere a la velocidad a la que se mueve la boquilla a lo largo de la trayectoria de corte. La velocidad de avance típica varía desde 5 mm/s (12 in/min) hasta más de 500 mm/s (1 200 in/min), dependiendo del material de trabajo y su grosor [5]. Por lo general, el WJC se realiza en forma automática usando un control numérico computarizado o robots industriales para manipular la unidad de boquilla a lo largo de la trayectoria deseada.

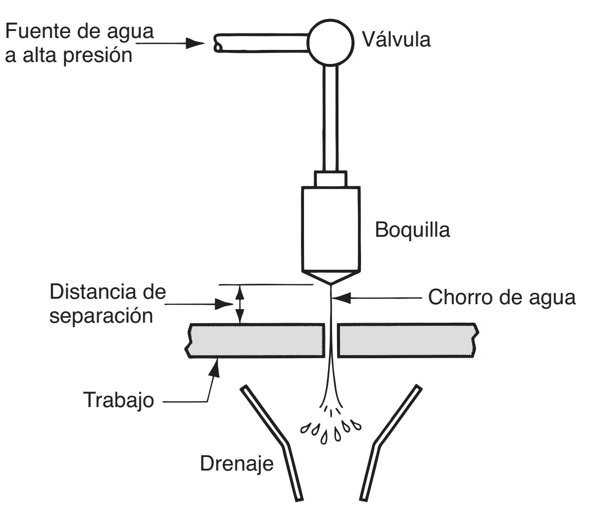


FIGURA 26.3 Corte con chorro de agua.

El corte con chorro de agua se usa en forma eficaz para obtener tiras de materia prima plana, como plásticos, textiles, materiales compuestos, mosaicos para pisos, alfombras, piel y cartulinas. Se han instalado celdas robóticas con boquillas para WJC ensambladas como la herramienta de un robot para seguir patrones tridimensionales de corte irregular, por ejemplo para cortar y rebordear tableros de automóvil antes del ensamble [8]. En estas aplicaciones, las ventajas del WJC incluyen 1) que la superficie de trabajo no se deforma ni quema como en otros procesos mecánicos o térmicos, 2) la pérdida de material es mínima porque la ranura de corte es estrecha, 3) se reduce la contaminación ambiental y 4) existe la facilidad de automatizar el proceso usando control numérico o robots industriales. Una limitación del WJC es que no es conveniente para cortar materiales frágiles (por ejemplo, vidrio), porque tienden a resquebrajarse durante el proceso.

Corte con chorro de agua abrasiva Cuando se usa un WJC sobre piezas metálicas, por lo general debe agregarse partículas abrasivas a la corriente a chorro para facilitar el corte. Por lo tanto, este proceso se denomina ***corte con chorro de agua abrasiva*** (en inglés AWJC). La incorporación de las partículas abrasivas al flujo complica el proceso porque aumenta la cantidad de parámetros que deben controlarse. Entre los parámetros de proceso adicionales están el tipo de abrasivo, el tamaño del grano y la proporción de abrasivo en el flujo. Entre los materiales abrasivos comunes están el óxido de aluminio, el dióxido de silicio y el granate (un mineral de silicato); los tamaños del grano varían entre 60 y 120. Las partículas abrasivas se agregan al chorro de agua a aproximadamente 0.25 kg/min (0.5 lb/min) después de que salen de la boquilla para el WJC.

Los parámetros de proceso restantes incluyen algunos que son comunes para el WJC: el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la distancia de separación. Los diámetros del orificio de la boquilla varían de 0.25 a 0.63 mm (0.010 a 0.025 in), el tamaño es más grande que en el corte con chorro de agua y permite que el chorro sea más denso y con mayor energía antes de la adición de abrasivos. Las presiones del agua son semejantes a las del WJC. Las distancias de separación son menores para reducir el efecto de la dispersión del fluido de corte, el cual contiene partículas abrasivas en esta etapa. Las distancias de separación típicas están entre una cuarta parte y la mitad de las que se usan en el WJC.

Maquinado con chorro abrasivo No debe confundirse el corte con chorro de agua abrasiva con el proceso denominado ***maquinado con chorro abrasivo*** (AJM, por sus siglas en inglés), el cual es un proceso de remoción de materiales que se produce por la acción de un flujo de gas a alta velocidad que contiene pequeñas partículas abrasivas, como se muestra en la figura 26.4. El gas es seco y se usan presiones de 0.2 a 1.4 MPa (25 a 200 lb/in^2) para propulsar el gas por los orificios de la boquilla con un diámetro de 0.075 a 1.0 mm (0.003 a 0.040 in), a velocidades de 2.5 a 5.0 m/s (500 a 1 000 ft/min). Los gases incluyen el aire seco, el nitrógeno, el dióxido de carbono y el helio.

Por lo general, el proceso lo realiza un operador en forma manual, quien dirige la boquilla hacia el trabajo. Las distancias típicas entre la punta de la boquilla y la superficie

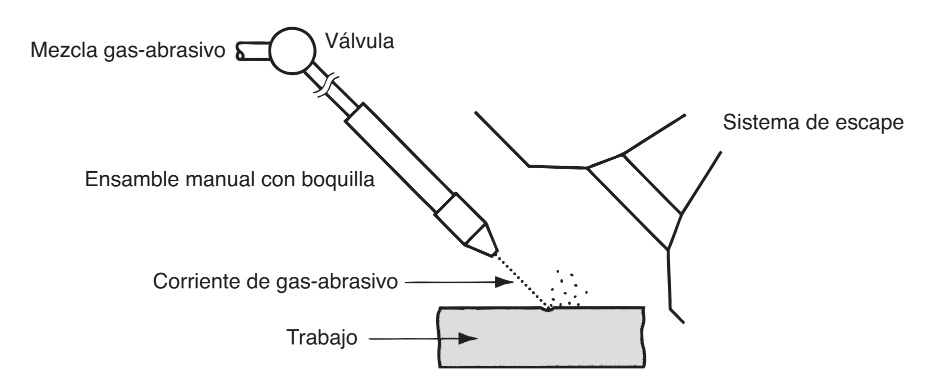


FIGURA 26.4 Maquinado con chorro abrasivo (AJM).

de trabajo varían entre 3 mm y 75 mm (0.125 y 3 in). La estación de trabajo debe contar con ventilación apropiada para el operador.

Normalmente, el AJM se usa como proceso de acabado y no como proceso de corte en la producción. Las aplicaciones incluyen el rebabeado, el retiro de virutas de cizallado y retiro de excedentes de material de forjado, la limpieza y el pulido. Los cortes se llevan a cabo sobre materiales duros y frágiles (por ejemplo, vidrio, silicio, mica y cerámica) que están en forma de materias primas planas y delgadas. Los abrasivos normales usados en el maquinado con chorro abrasivo incluyen el óxido de aluminio (para aluminio y latón), el carburo de silicio (para acero inoxidable y cerámica) y las perlas de vidrio (para pulido). Los tamaños de grano son pequeños, sus diámetros oscilan entre 15 y 40 μm (0.006 y 0.0016 in) y su tamaño debe ser muy uniforme para determinadas aplicaciones. Es importante no reciclar los abrasivos debido a que los granos usados se fracturan (por lo cual se reduce su tamaño), se gastan y contaminan.

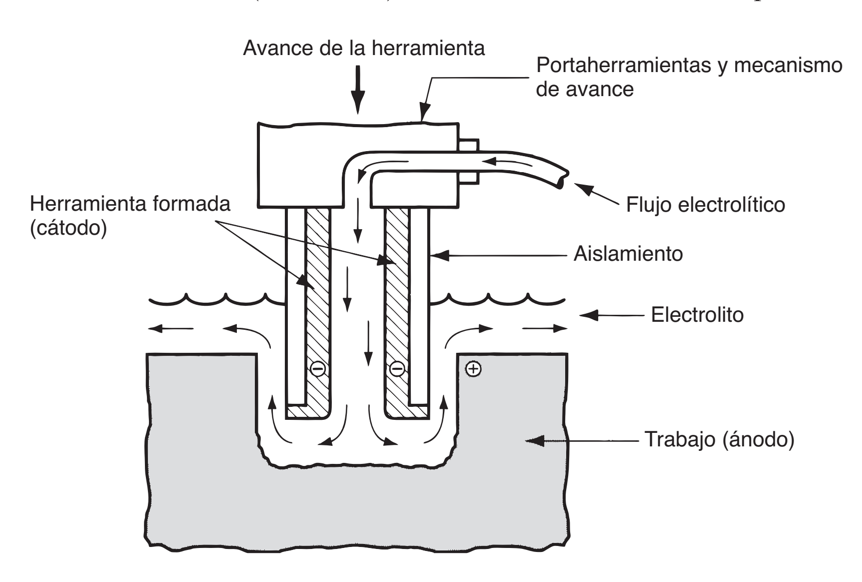
26.2 PROCESOS DE MAQUINADO ELECTROQUÍMICO

Un grupo importante de procesos no tradicionales utiliza la energía eléctrica para la remoción de material. Este grupo se identifica con el término de ***procesos electroquímicos***, debido a que se usa la energía eléctrica junto con reacciones químicas para obtener la remoción. De hecho, estos procesos son lo opuesto a la galvanoplastia (sección 29.1.1). El material de trabajo debe ser conductor en el maquinado electroquímico.

26.2.1 Maquinado electroquímico

El proceso básico en este grupo es el maquinado electroquímico (ECM por sus siglas en inglés). El ***maquinado electroquímico*** retira metal de una pieza de trabajo conductora de electricidad por medio de disolución anódica, en la cual se obtiene la forma de la pieza de trabajo a través de una herramienta formada por electrodos, muy próxima al trabajo, pero al mismo tiempo separada de él mediante un electrólito que fluye con rapidez. El ECM es básicamente una operación de remoción de recubrimientos galvánicos como se muestra en la figura 26.5. La pieza de trabajo es el ánodo y la herramienta es el cátodo. El proceso aplica el principio de que el material se retira de la superficie que funciona como ánodo (el polo positivo) y se deposita en el cátodo (el polo negativo) ante la presencia de un baño electrolítico (sección 4.5). La diferencia en el ECM es que el baño electrolítico

FIGURA 26.5 Maquinado electromecánico (ECM)



fluye con rapidez entre los dos polos para retirar el material removido de la superficie, de manera que el material que se retira de la pieza no forma una capa sobre la herramienta.

Por lo general, se diseña una herramienta de electrodos (hecha de cobre, bronce o acero inoxidable) que posee aproximadamente la forma inversa a la que se desea obtener. Debe considerarse una tolerancia en el tamaño de la herramienta para el espacio que existe entre la herramienta y el trabajo. Para conseguir la remoción de metal, se hace avanzar el electrodo hacia el trabajo a una velocidad igual a la velocidad de remoción del metal de trabajo. La velocidad de remoción del metal se determina por medio de la primera ley de Faraday, la cual establece que la cantidad de cambio químico que produce una corriente eléctrica (esto es, la cantidad de metal disuelto) es proporcional a la cantidad de electricidad trasmitida (corriente × tiempo):

$$V = CIt \tag{26.1}$$

donde V = volumen de metal removido, mm^3 (in^3); C = una constante llamada la velocidad de remoción específica, que depende del peso atómico, la valencia y la densidad del material de trabajo, mm^3/amp-s (in^3/amp-min); I = corriente, amps; y t = tiempo, s (min).

Con base en la ley de Ohm, la corriente $I = E/R$, donde E = voltaje y R = resistencia. Bajo las condiciones de la operación de ECM, la resistencia está dada por:

$$R = \frac{gr}{A} \tag{26.2}$$

donde g = separación entre el electrodo y el trabajo, mm (in); r = resistividad del electrolito, ohm-mm (ohm-in); y A = área de superficie entre el trabajo y la herramienta en la separación frontal del trabajo, mm^2 (in^2). Al sustituir esta expresión para R en la ley de Ohm, se obtiene

$$I = \frac{EA}{gr} \tag{26.3}$$

Al sustituir la expresión anterior en la ecuación que define la ley de Faraday,

$$V = \frac{C(EAt)}{gr} \tag{26.4}$$

Resulta conveniente convertir esta ecuación a una expresión para velocidad de avance, que es la velocidad a la cual el electrodo (la herramienta) puede avanzar hacia el trabajo. Esta conversión puede conseguirse en dos pasos. Primero, se divide la ecuación (26.4) por At (área × tiempo) para convertir el volumen de metal removido a una velocidad de desplazamiento lineal:

$$\frac{V}{At} = f_r = \frac{CE}{gr} \tag{26.5}$$

donde f_r = velocidad de avance, en mm/s (in/min). Segundo, se sustituye I/A en lugar de $E/(gr)$, como se da en la ecuación (26.3). Por lo tanto, la velocidad de avance en el ECM es:

$$f_r = \frac{CI}{A} \tag{26.6}$$

donde A = el área frontal del electrodo, mm^2 (in^2). Ésta es el área proyectada de la herramienta en la dirección del avance hacia el trabajo. Los valores de la velocidad de remoción específica C se presentan en la tabla 26.1 para diferentes materiales de trabajo. Debe observarse que esta ecuación supone una eficiencia de 100% en la remoción de metal. La eficiencia real está entre 90 y 100% y depende de la forma de la herramienta, el voltaje y la densidad de corriente**,** así como de otros factores.

EJEMPLO 26.1 Maquinado electroquímico

Se usará una operación de ECM para cortar un orificio en una placa de aluminio con un grosor de 12 mm. El orificio tiene una sección transversal rectangular de 10 mm por 30 mm. La operación de ECM se conseguirá bajo una corriente de 1 200 amps. Se espera una eficiencia de 95%. Determine la velocidad de avance y el tiempo requeridos para cortar la placa.

Solución: Por los datos de la tabla 26.1, la velocidad de remoción específica *C* para el aluminio es de 3.44×10^{-2} mm^3/A-s. El área frontal del electrodo $A = 10$ mm × 30 mm = 300 mm^2. A un nivel de corriente de 1 200 amps, la velocidad de avance es

$$f_r = 0.0344 \text{ mm}^3/\text{A-s}\left(\frac{1200}{300}\text{ A/mm}^2\right) = 0.1376 \text{ mm/s}$$

A una eficiencia de 95%, la velocidad de avance real es

$$f_r = 0.1376 \text{ mm/s}(0.95) = 0.1307 \text{ mm/s}$$

El tiempo para maquinar a través de la placa de 12 mm es

$$T_m = \frac{12.0}{0.1307} = 91.8\text{s} = 1.53 \text{ min}$$

■

Las ecuaciones anteriores indican que los parámetros de proceso más importantes para determinar la velocidad de remoción de metal y la velocidad de avance en el maquinado electroquímico son: la distancia de separación *g*, la resistividad electrolítica *r*, la corriente *r* y el área frontal de electrodos *A*. La distancia de separación necesita controlarse con mucha atención. Si *g* se hace demasiado grande, el proceso electroquímico se vuelve lento. Sin embargo, si el electrodo toca el trabajo, ocurre un cortocircuito que detiene todo el proceso. Como una cuestión práctica, la distancia de separación por lo general se mantiene dentro de un rango de 0.075 a 0.75 mm (0.003 a 0.030 in).

El agua se utiliza como base para el material electrolítico en el ECM. Para reducir la resistividad del material electrolítico se añaden sales a la solución, tales como NaCl o $NaNO_3$. Además de retirar los materiales removidos de la pieza de trabajo, el flujo electrolítico también sirve para retirar el calor y las burbujas de hidrógeno que se crean en las reacciones químicas del proceso. El material de trabajo removido está en forma de partículas microscópicas que deben separarse del material electrolítico mediante centrifugado, sedimentación u otros medios. Las partículas separadas forman una gruesa capa cuya disposición es un problema ambiental asociado con el ECM.

Para realizar un ECM, se requieren grandes cantidades de potencia eléctrica. Como indican las ecuaciones, la potencia eléctrica determina la velocidad de remoción de metal, específicamente la densidad de corriente que se proporciona para la operación. El voltaje en un ECM se conserva relativamente bajo para minimizar la generación de arcos a través de la separación.

Por lo general, el maquinado electroquímico se usa en aplicaciones donde el metal de trabajo es muy duro o difícil de maquinar o donde es difícil (o imposible) obtener una geometría de piezas de trabajo mediante métodos de maquinado convencionales. La dureza del trabajo no representa una diferencia en el ECM, debido a que la remoción del metal no es mecánica. Las aplicaciones típicas del ECM incluyen 1) ***Cavidades de troqueles***, la cual implica el maquinado de formas y contornos irregulares en matrices de forjado, moldes plásticos y otras herramientas de formado; 2) barrenado de orificios múltiples, donde con el ECM es posible el barrenado de muchos orificios en forma simultánea, a diferencia del

TABLA 26.1 Valores típicos de una velocidad de remoción específica para materiales de trabajo seleccionados en el maquinado electroquímico.

Material de trabajo[a]	Velocidad de remoción específica *C* mm³/amp-sec	in³/amp-min	Material de trabajo[a]	Velocidad de remoción específica *C* mm³/amp-s	in³/amp-min
Aluminio (3)	3.44×10^{-2}	1.26×10^{-4}	Aceros:		
Cobre (1)	7.35×10^{-2}	2.69×10^{-4}	De baja aleación	3.0×10^{-2}	1.1×10^{-4}
Hierro (2)	3.69×10^{-2}	1.35×10^{-4}	De alta aleación	2.73×10^{-2}	1.0×10^{-4}
Níquel (2)	3.42×10^{-2}	1.25×10^{-4}	Inoxidable	2.46×10^{-2}	0.9×10^{-4}
			Titanio (4)	2.73×10^{-2}	1.0×10^{-4}

Recopilado de los datos en [7].

[a]La valencia más común se proporciona entre paréntesis () y se supone para determinar la velocidad de remoción específica *C*. Para una valencia diferente, *C* se calcula multiplicando este valor por la valencia más común y dividiéndola entre la valencia real.

taladrado convencional que requeriría que los orificios se hiciesen en forma secuencial; 3) orificios que no son redondos, dado que el maquinado electroquímico no usa un taladro rotatorio; y 4) la remoción de rebabas (sección 26.2.2).

Las ventajas del ECM incluyen 1) poco daño superficial a la pieza de trabajo, 2) no hay rebabas como en el maquinado convencional, 3) un bajo desgaste de la herramienta (el único desgaste de la herramienta se produce por el flujo electrolítico) y 4) velocidades de remoción de metal relativamente altas para metales duros y difíciles de maquinar. Las desventajas del ECM son: 1) un costo significativo en el consumo de energía eléctrica necesaria para ejecutar la operación y 2) problemas de disposición de la masa electrolítica de desecho.

26.2.2 Remoción de virutas y esmerilado con material electroquímico

La ***remoción electroquímica de virutas*** (ECD, por sus siglas en inglés) es una adaptación del ECM diseñada para retirar las virutas o para redondear las esquinas agudas de piezas de trabajo metálico mediante disolución anódica. En la figura 26.6 se muestra una disposición posible para la ECD. El orificio en la pieza de trabajo tiene una rebaba o viruta filosa del tipo que se produce en una operación de taladrado convencional a través de un orificio. La herramienta de electrodos está diseñada para concentrar la acción de remoción de metal en la viruta. Se aíslan las partes de la herramienta que no se usan para el maquinado. El material electrolítico fluye por el orificio para desalojar las partículas de la viruta. En la ECD se aplican los mismos principios de la operación de ECM. Sin embargo, dado que se retira mucho menos material en una ECD, los ciclos de tiempo son mucho más breves. Un ciclo de tiempo típico en la remoción electroquímica de virutas es menor de un minuto. El tiempo aumenta si se pretende redondear una esquina además de remover la viruta.

El ***esmerilado electroquímico*** (ECG, por sus siglas en inglés) es una forma especial de ECM, en el cual se usa una rueda de esmeril rotatoria con un material de enlace conductivo para aumentar la disolución anódica de la superficie metálica de la pieza de trabajo, como se muestra en la figura 26.7. Los abrasivos usados en el ECG incluyen el óxido de aluminio y el diamante. El material de enlace es metálico (para abrasivos de diamante) o es resina impregnada con partículas metálicas para hacerlo eléctricamente conductivo (para el óxido de aluminio). Los granos abrasivos que sobresalen de la rueda de esmeril y entran en contacto con la pieza de trabajo establecen la distancia de separación en el ECG. Los electrólitos fluyen por la separación entre los granos para cumplir su función en la electrólisis.

La acción electroquímica es responsable de 95% o más de la remoción de metal en el esmerilado electroquímico, y la acción abrasiva de la rueda de esmeril elimina 5% restante o menos, sobre todo en forma de películas salinas que se producen en la superficie de trabajo durante las reacciones electroquímicas. Debido a que gran parte del maquinado se consigue mediante acción electroquímica, una rueda de esmeril en este proceso dura mucho más que una rueda en el esmerilado convencional. El resultado es una velocidad de esmerilado mucho más alta. Además, el aderezado de la rueda de esmeril se requiere con mucha menor frecuencia. Éstas son las ventajas más importantes del proceso. Las aplicaciones del ECG incluyen el afilado de herramientas de carburo cementado y el esmerilado de agujas quirúrgicas, corte de tubos de pared delgada y piezas frágiles.

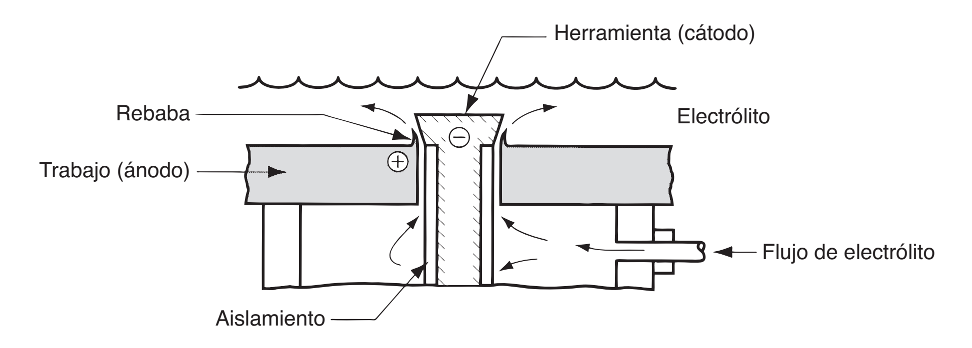


FIGURA 26.6 Remoción electroquímica de virutas (ECD).

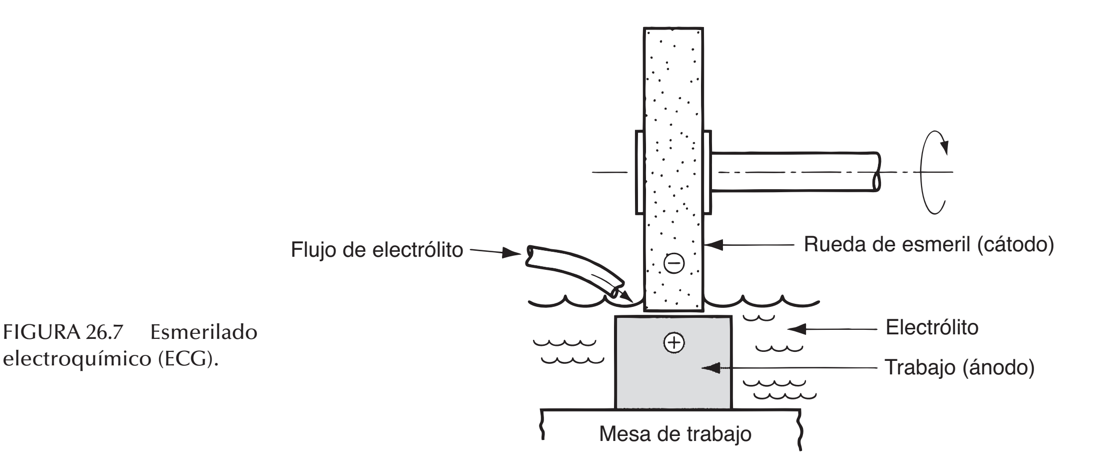


FIGURA 26.7 Esmerilado electroquímico (ECG).

26.3 PROCESOS DE ENERGÍA TÉRMICA

Los procesos de remoción de material basados en la energía térmica se caracterizan por temperaturas locales muy altas, con calor suficiente para remover material mediante fusión o vaporización. Debido a las altas temperaturas, estos procesos producen daños físicos y metalúrgicos en la nueva superficie de trabajo. En algunos casos, el acabado resultante es tan deficiente que se requiere un procesamiento posterior para alisar la superficie. En esta sección se examinan varios procesos de energía térmica que tienen importancia comercial: 1) Electroerosión maquinado por descarga eléctrica y corte por descarga eléctrica con alambre, 2) maquinado con haz de electrones, 3) maquinado con haz láser, 4) maquinado con arco de plasma y 5) procesos convencionales de corte térmico.

26.3.1 Procesos con descarga eléctrica (electroerosión)

Los procesos de remoción de material con descarga eléctrica retiran metal mediante una serie de descargas eléctricas discontinuas (arcos eléctricos) que producen temperaturas localizadas suficientemente altas para fundir o vaporizar el metal en la vecindad inmediata a la descarga. Los dos procesos principales en esta categoría son: 1) electroerosión por penetración y 2) electroerosión con alambre. Estos procesos sólo pueden usarse en materiales de trabajo eléctricamente conductivos. El video clip sobre maquinado con descarga eléctrica ilustra los diferentes tipos de EDM.

Electroerosión por penetración (EDM ram) El maquinado por descarga eléctrica (EDM) es uno de los procesos no tradicionales de uso más amplio. En la figura 26.8 se muestra una disposición de EDM. La forma de la superficie de trabajo acabada se produce mediante una herramienta formada que actúa como electrodo. Ocurren arcos eléctricos a través de una pequeña separación entre la herramienta y la superficie de trabajo. El proceso de EDM debe realizarse en presencia de un fluido dieléctrico, el cual crea una trayectoria para cada descarga conforme se ioniza el fluido en la separación. Las descargas se generan mediante un transformador de corriente directa pulsante conectado al trabajo y a la herramienta.

En la figura 26.8*b* se muestra un acercamiento de la separación entre la herramienta y el trabajo. La descarga ocurre en la posición en la que las dos superficies están más cerca. El fluido dieléctrico se ioniza en esta posición con el fin de crear una trayectoria para la

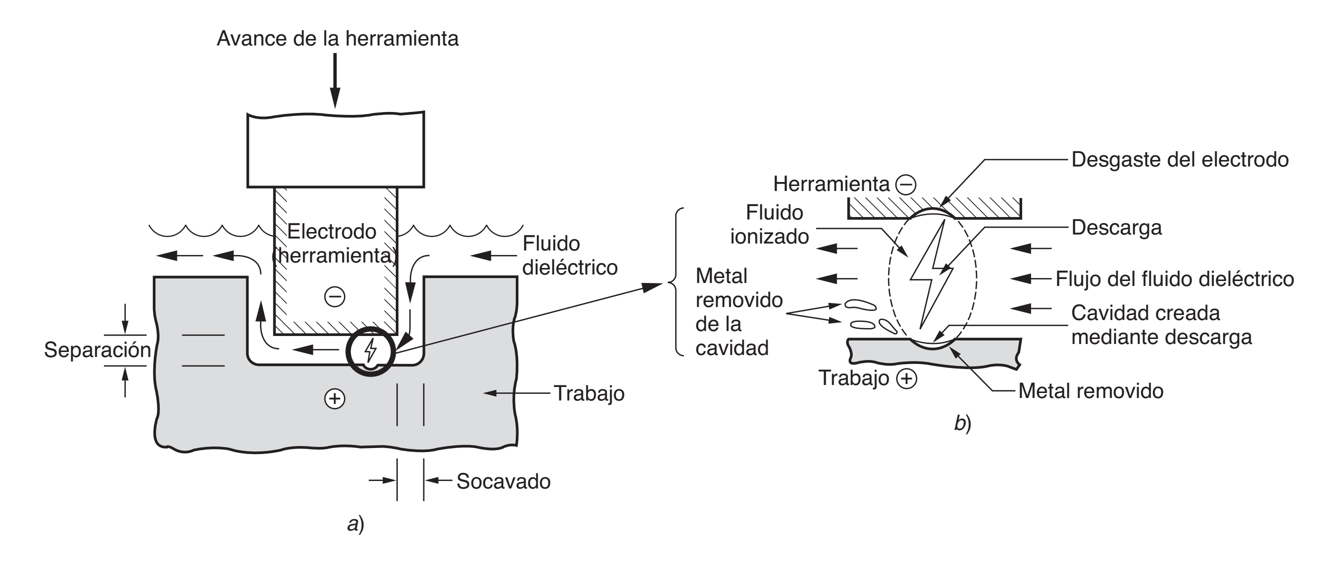
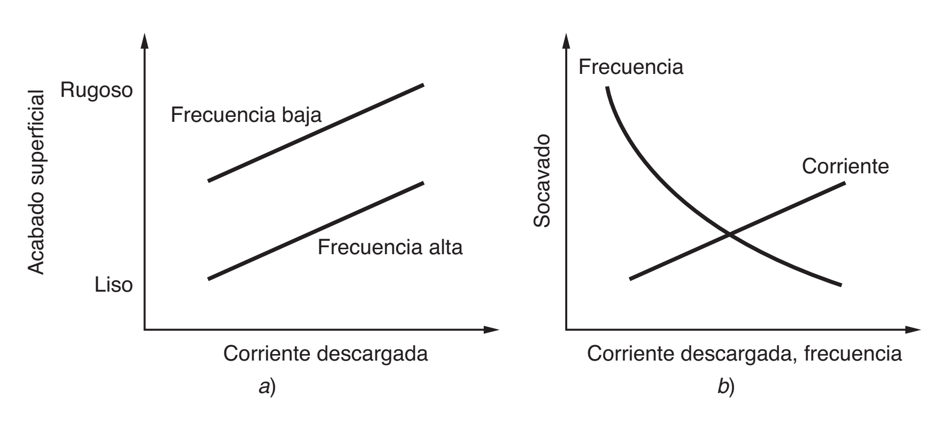


FIGURA 26.8 Maquinado por descarga eléctrica: *a*) disposición general y *b*) vista de acercamiento de la separación, que muestra la descarga y la remoción de metal.

descarga. La región en la que ocurre la descarga se calienta a temperaturas extremadamente altas, de modo que una pequeña parte de la superficie de trabajo se funde repentinamente y es removida. Después, el flujo dieléctrico aleja la pequeña partícula (llamada rebaba o viruta). Como la superficie de trabajo en la posición previa a la descarga está a una distancia mayor de la herramienta, ésta es la posición menos probable para que ocurra otra chispa hasta que las regiones que la rodean se hayan reducido al mismo nivel o a uno inferior. Aunque las descargas individuales retiran material en puntos muy localizados, ocurren cientos o miles de veces por segundo, de modo que sucede una erosión gradual de toda la superficie en el área de la separación.

Dos parámetros importantes en el proceso de EDM son la corriente descargada y la frecuencia de la descarga. Conforme aumenta cualquiera de estos parámetros, se incrementa la velocidad de remoción de metal. La aspereza de la superficie también se ve afectada por la corriente y la frecuencia, como se muestra en la figura 26.9*a*). El mejor acabado en la superficie se obtiene cuando el EDM se realiza a frecuencias altas y corrientes de descarga bajas. Conforme la herramienta de electrodos penetra en el trabajo ocurre un excedente de corte. El ***socavado*** en el EDM es la distancia por la que la cavidad maquinada rebasa el tamaño de la herramienta en cada lado de la misma, como se muestra en la figura 26.8*a*). Este efecto se debe a que las descargas eléctricas ocurren tanto a los lados de la herramienta, como en su parte frontal. El socavado es una función de la corriente y la frecuencia, como se ilustra en la figura 26.9*b*), y puede llegar a ser de varias milésimas de in.

FIGURA 26.9 *a*) Acabado superficial en EDM como una función de la corriente descargada y la frecuencia de las descargas. *b*) socavado en el EDM como una función de la corriente descargada y la frecuencia de las descargas.



Debe señalarse que las altas temperaturas de las chispas que funden el trabajo también afectan a la herramienta, al crear una pequeña cavidad en la superficie opuesta a la cavidad producida en el trabajo. Por lo general, el desgaste de la herramienta se mide como la razón del material de trabajo removido entre el material removido de la herramienta (semejante a la relación de esmerilado). Esta razón de desgaste varía entre 1.0 y 100 o un poco más, dependiendo de la combinación del trabajo y los materiales de los electrodos. Los electrodos pueden fabricarse de grafito, cobre, latón, tungsteno aleado con cobre, tungsteno aleado con plata y otros materiales. La selección depende del tipo de circuito del transformador de potencia disponible en la máquina para EDM, el tipo de material de trabajo que se va a maquinar y si se va a pulir o a dar un acabado al material. En muchas aplicaciones se prefiere el grafito debido a sus características de fusión. De hecho, el grafito no se funde, sino que se vaporiza a muy altas temperaturas, y la cavidad creada por el arco eléctrico generalmente es más pequeña que en los restantes materiales de electrodos para EDM. En consecuencia, con las herramientas de grafito se obtiene una razón alta de material de trabajo removido sobre desgaste de la herramienta.

La dureza y la resistencia del material de trabajo no son factores en el EDM, puesto que el proceso no es una competencia de dureza entre la herramienta y el trabajo. El punto de fusión del material de trabajo es una propiedad importante, y la velocidad de remoción de metal se relaciona, en forma aproximada, con el punto de fusión mediante la siguiente fórmula empírica, basada en una ecuación descrita en Weller [16|:

$$R_{MR} = \frac{KI}{T_m^{\ 1.23}} \tag{26.7}$$

donde R_{MR} = velocidad de remoción de metal, mm³/s (in³/min); K = constante de proporcionalidad cuyo valor de 664 en unidades del SI (5.08 en unidades de uso común en Estados Unidos); I = corriente descargada, amperes; y T_m = temperatura de fusión del metal de trabajo, °C (°F). Los puntos de fusión de los metales seleccionados se enlistan en la tabla 4.1.

EJEMPLO 26.2
Maquinado por descarga eléctrica

Se debe maquinar cierta aleación cuyo punto de fusión = 1 100 °C en una operación de EDM. Si se descarga una corriente = 25 amps, ¿cuál es la velocidad esperada de remoción de metal?

Solución: A partir de la ecuación (26.7), la velocidad anticipada de remoción de metal es

$$R_{MR} = \frac{664(25)}{1100^{1.23}} = 3.01 \text{ mm}^3/\text{s}$$

■

Los fluidos dieléctricos usados en el EDM incluyen los aceites de hidrocarburos, el queroseno y el agua destilada o deionizada. El fluido dieléctrico funciona como un aislante en la separación, excepto cuando ocurre una ionización en presencia de un arco eléctrico. Otras de sus funciones consisten en desalojar el material removido de la separación y retirar el calor de la herramienta y la pieza de trabajo.

Las aplicaciones del maquinado por descarga eléctrica incluyen tanto la fabricación de herramientas como la producción de piezas. Con frecuencia, la fabricación de herramientas para muchos de los procesos mecánicos analizados en este libro se realiza mediante EDM, incluidos moldes para inyección en plásticos, dados para extrusión, dados para estirado de alambres, matrices para forja y recalcado y matrices para estampado en láminas metálicas. Como en el ECM, el término ***maquinado por penetración*** se usa para operaciones en las que se produce una cavidad de molde, y el proceso EDM se llama algunas veces ***EDM ram***. Para muchas de estas aplicaciones, los materiales usados para habilitar herramientas son difíciles (o imposibles) de maquinar mediante métodos convencionales. Ciertas partes de un producto también requieren de una aplicación de EDM. Los ejemplos incluyen algunas partes delicadas que no son lo bastante rígidas para soportar las fuerzas de corte convencionales: el taladrado de orificios donde los ejes del agujero forman un ángulo agudo con respecto a la superficie, donde con un taladrado convencional no podría iniciar el orificio, y el maquinado para la producción de metales duros y raros.

Electroerosión con alambre El ***corte por descarga eléctrica con alambre*** (EDWC, por sus siglas en inglés), comúnmente llamado ***EDM con alambre***, es una forma especial del maquinado

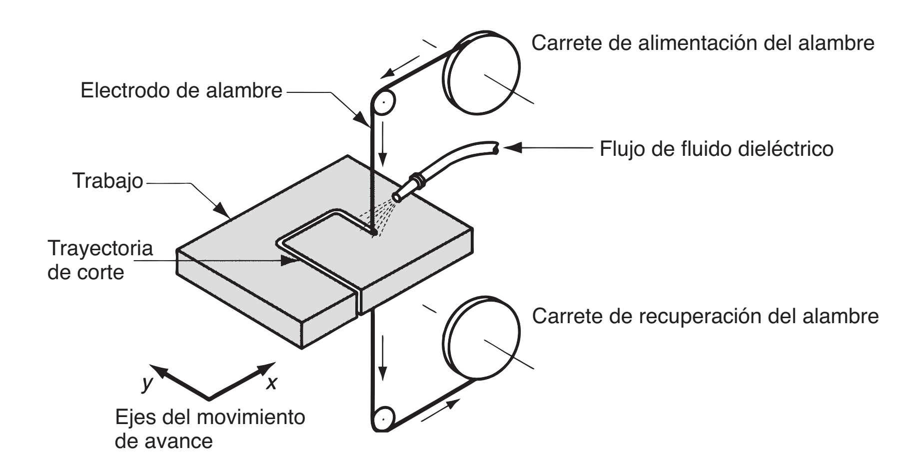


FIGURA 26.10 Corte por descarga eléctrica con alambre (EDWC), también llamado EDM con alambre.

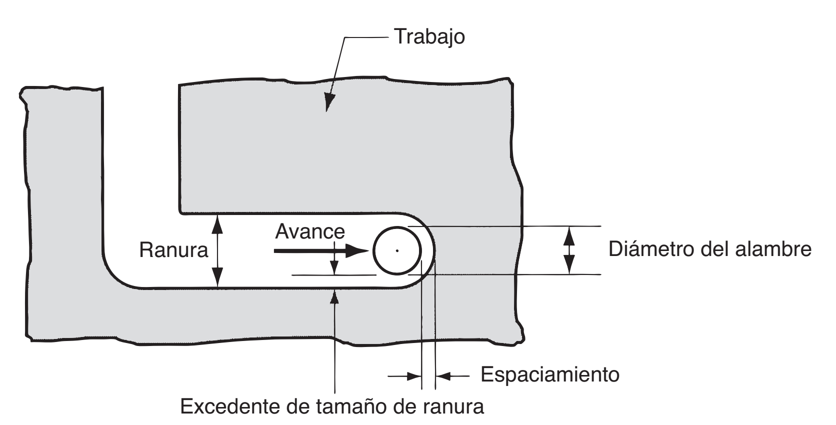
con descarga eléctrica que usa un alambre de diámetro pequeño como electrodo para cortar una ranura exacta en el trabajo. La acción de corte en el EDM con alambre se obtiene por medio de energía térmica, a partir de las descargas eléctricas entre el alambre electrodo y la pieza de trabajo. El EDM con alambre se ilustra en la figura 26.10. La pieza de trabajo avanza en forma continua y lenta a través del alambre para obtener la trayectoria de corte deseada, de un modo parecido a una operación con sierra caladora. El control numérico se usa para fijar los movimientos de la pieza de trabajo durante el corte. Conforme se realiza el corte, el alambre avanza en forma continua entre un carrete de alimentación y uno de recuperación para presentar un electrodo nuevo de diámetro constante para el trabajo. Esto ayuda a mantener una ranura de corte constante durante el proceso. Al igual que en el EDM, el EDM con alambre debe realizarse en presencia de un material dieléctrico. Éste puede aplicarse ya sea mediante boquillas dirigidas a la intersección herramienta-trabajo, como en la figura, o por inmersión de la pieza de trabajo en un baño dieléctrico.

Los diámetros del alambre varían entre 0.076 y 0.30 mm (0.003 a 0.012 in), dependiendo de la anchura de ranura requerida. Los materiales que se usan para el alambre incluyen el latón, el cobre, el tungsteno y el molibdeno. Los fluidos dieléctricos incluyen el agua deionizada o el aceite. Al igual que en el EDM, en el EDWC existe una distancia entre el alambre y la pieza de trabajo, que provoca que el corte producido sea mayor que el diámetro del alambre, como se muestra en la figura 26.11. Dicha distancia está en el rango de 0.020 a 0.050 mm (0.0008 a 0.002 in). Una vez establecidas las condiciones de corte para una operación determinada, la distancia de separación entre el alambre y la pieza permanecen bastante constantes y predecibles.

Aunque el EDWC se asemeja a una operación con sierra caladora, su precisión es mucho mayor que la de esta última. La ranura es mucho más pequeña, es posible hacer más agudas las esquinas y, por lo tanto, las fuerzas de corte en contra del trabajo son nulas. Además, la dureza y la resistencia del material de trabajo no afectan el rendimiento del corte. El único requisito es que el material de trabajo debe ser eléctricamente conductivo.

Las características especiales del EDM con alambre lo hacen ideal para fabricar componentes para matrices de corte para troqueles. Debido que la ranura es tan pequeña, con

FIGURA 26.11 Definición de excedente de tamaño de ranura respecto al diámetro de alambre en el corte por descarga eléctrica con alambre.



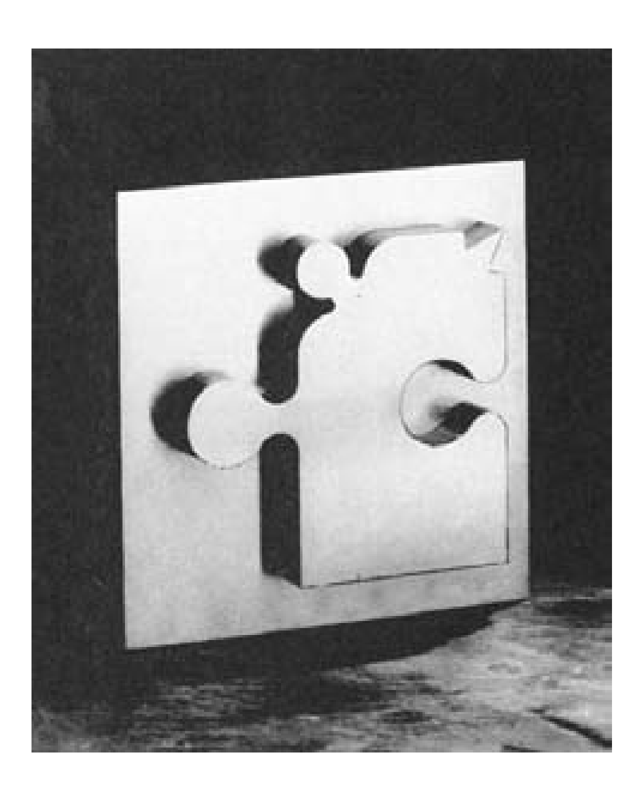


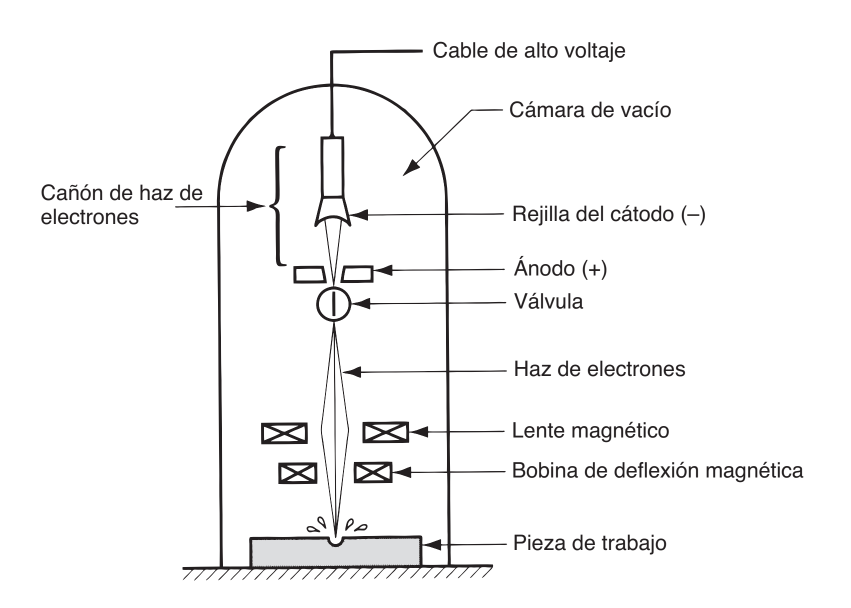
FIGURA 26.12 Corte de contorno irregular de un bloque sólido de metal mediante EDM con alambre. (Fotografía cortesía de LeBlond Makino Machine Tool Company).

frecuencia es posible fabricar punzones y matrices en un solo corte, como se sugiere en la figura 26.12. La manufactura de otras herramientas y piezas con formas de contornos complicados, como herramientas de formado para torneado, dados para extrusión y plantillas planas, se hace mediante corte por descarga eléctrica con alambre.

26.3.2 Maquinado con haz de electrones

El maquinado con haz de electrones (EBM, por sus siglas en inglés) es uno de los varios procesos industriales que usan haces de electrones. Además del maquinado, otras aplicaciones de esta tecnología incluyen el tratamiento térmico (sección 27.5.2) y la microsoldadura (sección 31.4.1). El ***maquinado con haz de electrones*** utiliza una corriente de electrones a alta velocidad enfocada hacia la superficie de la pieza de trabajo para remover material mediante fusión y vaporización. En la figura 26.13 se muestra un esquema del

FIGURA 26.13 Maquinado con haz de electrones (EBM).



proceso EBM. Un cañón de haz de electrones genera una corriente continua de electrones que se aceleran a aproximadamente 75% de la velocidad de la luz y se enfocan a través de un lente electromagnético sobre la superficie de trabajo. El lente es capaz de reducir el área del haz a un diámetro tan pequeño como 0.025 mm (0.001 in). Al chocar contra la superficie, la energía cinética de los electrones se convierte en energía térmica de una densidad muy alta, la cual funde o vaporiza el material en un área localizada.

El maquinado con haz de electrones se usa para diversas aplicaciones de corte de alta precisión sobre cualquier material conocido. Las aplicaciones incluyen el taladrado de orificios de diámetro muy pequeño, hasta 0.05 mm (0.002 in) de diámetro, el taladrado de orificios cuya relación entre profundidad y diámetro sea muy alta, mayores que 100:1, y el corte de ranuras con una anchura de 0.001 in (0.025 mm). Estos cortes pueden hacerse con tolerancias muy pequeñas sin fuerzas de corte ni desgaste de las herramientas. El proceso es ideal para el nanomaquinado y por lo general se limita a operaciones de corte en piezas delgadas, en el rango de 0.25 a 6.3 mm (0.010 a 0.250 in) de grosor. El EBM debe realizarse en una cámara de vacío para eliminar la colisión de los electrones con las moléculas de la atmósfera. Otras limitaciones incluyen la alta energía requerida y el equipo costoso.

26.3.3 Maquinado con haz láser

Los láser se han usado para diversas aplicaciones industriales que incluyen el tratamiento térmico (sección 27.5.2), la microsoldadura (sección 31.4.2) y la medición (sección 44.5.2), así como en los procesos de grabado, taladrado y corte (que se describen aquí). El término ***láser*** está formado por las siglas en inglés de ***l***ight ***a***mplification by ***s***timulated ***e***mission of ***r***adiation (amplificación luminosa de emisiones de radiación estimulada). Un láser es un transductor óptico que convierte energía eléctrica en un haz luminoso altamente consistente. Un haz láser tiene varias propiedades que lo distinguen de otras formas de luz. Es monocromático (en teoría, la luz tiene una longitud de onda única) y muy alineado (los rayos de luz en el haz son casi perfectamente paralelos). Estas propiedades permiten enfocar la luz generada por un láser, mediante lentes ópticos convencionales, sobre un punto muy pequeño, produciendo densidades muy potentes. Dependiendo de la cantidad de energía que contiene el haz de luz y su grado de concentración en el punto, pueden realizarse los diversos procesos con láser que se identifican a continuación.

El maquinado por haz láser (LBM, por sus siglas en inglés) usa la energía luminosa de un láser para remover material mediante vaporización y desgaste. La instalación para el LBM se ilustra en la figura 26.14. Los tipos de láser usados en este proceso son de gas de dióxido de carbono y de estado sólido (de los cuales hay varios tipos). En el maquinado por haz láser, la energía del haz de luz coherente se concentra no sólo en forma óptica, sino también en términos de tiempo. El haz de luz se dirige para que la energía liberada produzca un impulso contra la superficie de trabajo, lo que a su vez produce una combinación de evaporación y fusión, con la salida de material fundido desde la superficie de trabajo a alta velocidad.

El LBM se usa para ejecutar diferentes tipos de operaciones de taladrado, corte en tiras, ranurado, grabado y marcado. Es posible obtener un taladrado con orificios de diámetro pequeño, hasta de 0.025 mm (0.001 in). Para orificios más grandes, cuyo diámetro es superior a 0.50 mm (0.020 in), el haz láser se controla para cortar el contorno del orificio. El LBM no se considera un proceso de producción en masa y, por lo general, se usa en lotes pequeños. El rango de materiales de trabajo que se pueden maquinar mediante este proceso es virtualmente ilimitado. Las propiedades ideales de un material para LBM incluyen una alta absorción de energía luminosa, baja reflectividad, buena conductividad térmica, bajo calor específico, bajo calor de fusión y bajo calor de evaporación. Por supuesto, ningún material tiene esta combinación ideal de propiedades. La lista real de materiales de trabajo procesados mediante LBM incluye metales con alta dureza y resistencia, metales suaves, cerámica, vidrio y cristal epóxicos, plástico, caucho, textiles y madera.

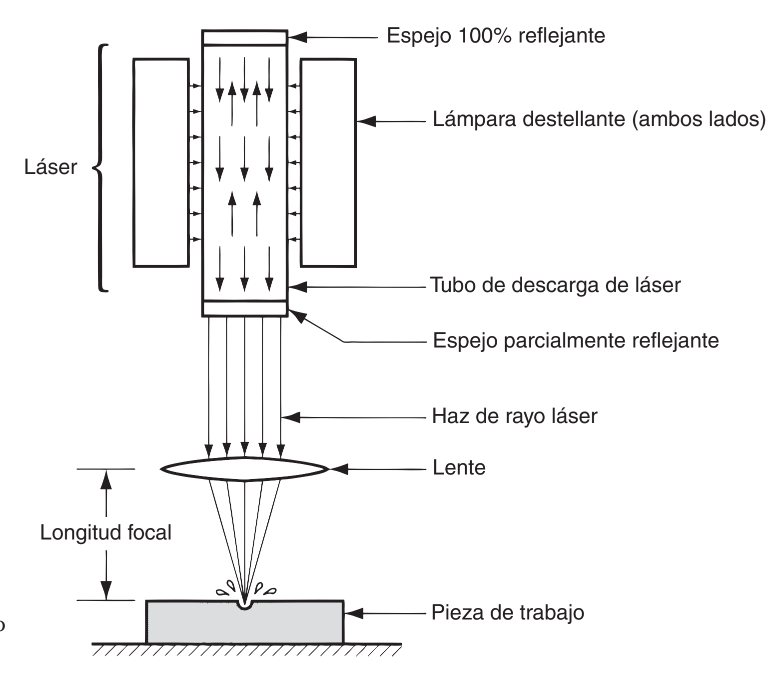


FIGURA 26.14 Maquinado por haz láser (LBM).

26.3.4 Procesos de corte con arco eléctrico

El intenso calor que proviene de un arco eléctrico puede usarse para fundir virtualmente cualquier metal con el propósito de soldar o cortar. La mayoría de los procesos de corte usan el calor generado por un arco entre un electrodo y una pieza de trabajo metálica (por lo general una placa o lámina planas) para fundir una ranura que separe la pieza. Los procesos de corte con arco eléctrico más comunes son: 1) el corte con arco de plasma y 2) el corte con arco de carbono y aire [10].

Corte con arco de plasma Un ***plasma*** se define como un gas supercalentado y ionizado eléctricamente. El **corte con *arco de plasma*** (PAC por sus siglas en inglés) usa una corriente de plasma que opera a altas temperaturas en el rango de 10 000 a 14 000 °C (18 000 a 25 000 °F) para cortar metal por fusión como se muestra en la figura 26.15. En la acción de corte se dirige la corriente de plasma a alta velocidad hacia el trabajo; esta misma acción funde e impulsa el metal fundido por la ranura. El arco de plasma se genera entre un electrodo dentro del soplete y la pieza de trabajo (ánodo). El plasma fluye a través de una boquilla enfriada con agua, que controla y dirige la corriente a la posición deseada del trabajo. El chorro de plasma resultante es una corriente de alta velocidad bien alineada con temperaturas extremadamente altas en su centro, y con el calor suficiente para cortar a través de un metal, que en algunos casos tiene un espesor de 150 mm (6 in).

Los gases usados para crear el plasma en el PAC incluyen el nitrógeno, el argón, el hidrógeno o una mezcla de éstos. Tales fluidos se denominan los gases primarios en el proceso. Con frecuencia se dirigen gases secundarios o agua para rodear el chorro de plasma, a fin de ayudar a confinar el arco y limpiar la ranura de metal que se forma.

La mayoría de las aplicaciones del PAC implican el corte de láminas de metal y placas planas. Las operaciones incluyen el barrenado y el corte a lo largo de una trayectoria definida. La trayectoria deseada se corta ya sea mediante un soplete manual controlado por una persona o dirigiendo la trayectoria de corte del soplete mediante control numérico (CN). Para una producción más rápida y una mayor precisión se prefiere el CN, debido a que se supervisan mejor las variables más importantes del proceso, como la distancia de separación y la velocidad de avance. El corte con arco de plasma puede usarse para cortar casi cualquier metal eléctricamente conductivo. Con frecuencia los metales cortados mediante PAC incluyen aceros al carbono simple, el acero inoxidable y el aluminio. En

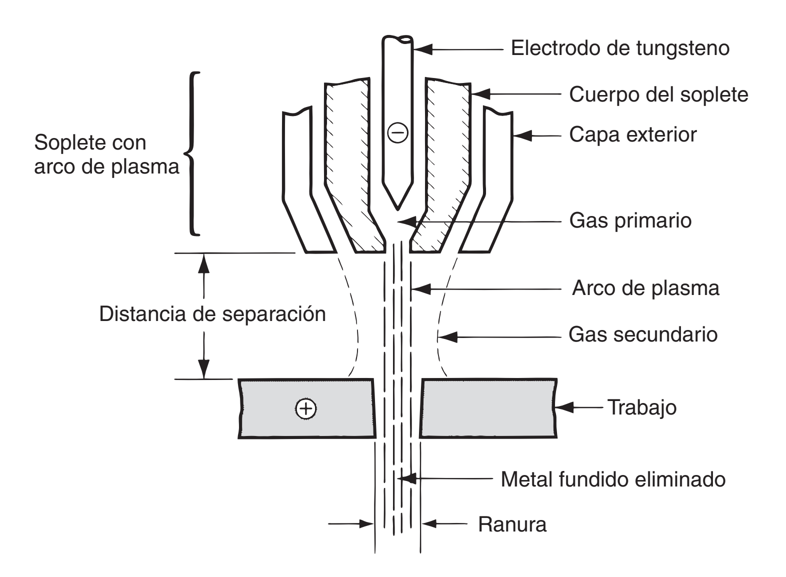


FIGURA 26.15 Corte con arco de plasma (PAC).

estas aplicaciones, la ventaja del corte con arco de plasma con CN es la alta productividad. Las velocidades de alimentación a lo largo de la trayectoria de corte pueden ser tan altas como 200 mm/s (450 in/min) para una placa de aluminio de 6 mm (0.25 in), y de 85 mm/s (200 in/min) para una placa de acero de 6 mm (0.25 in) [7]. Para materiales más gruesos, las velocidades de avance deben reducirse. Por ejemplo, la velocidad de avance máxima para cortar materia prima de aluminio de 100 mm (4 in) de espesor es de alrededor de 8 mm/s (20 in/min) [7]. Las desventajas del PAC son: 1) la superficie de corte es áspera y 2) el daño metalúrgico en la superficie es el más severo entre los procesos metalúrgicos no tradicionales.

Corte con arco de carbono y aire En este proceso, el arco se genera entre un electrodo de carbono y un metal, y se usa un chorro de aire a alta velocidad para alejar la parte fundida del metal. Este procedimiento se usa con el propósito de formar una ranura para separar la pieza o para formar una cavidad en ella. La cavidad prepara los bordes de las placas para la soldadura por fusión, por ejemplo, para crear un surco en forma de U en una junta empalmada (sección 30.2). El corte con arco de carbono y aire se usa en una variedad de metales, incluidos el hierro colado, el acero al carbono, las aleaciones bajas y el acero inoxidable, así como diversas aleaciones no ferrosas. La salpicadura de metal fundido es un riesgo y una desventaja del proceso.

Otros procesos de corte con arco Otros procesos de arco eléctrico se utilizan para aplicaciones de corte, aunque no con tanta frecuencia como el corte con arco de plasma o con arco de carbono y aire. Estos otros procesos incluyen: 1) el corte de metal con arco eléctrico y gas, 2) el corte con arco protegido, 3) el corte con arco eléctrico por tungsteno y gas y 4) el corte con arco de carbono. Las tecnologías son las mismas que se usan en la soldadura de arco (sección 31.1), excepto porque el calor del arco eléctrico se usa para cortar.

26.3.5 Procesos de corte con oxígeno y gas combustible

Una familia de procesos de corte térmico de uso muy difundido, conocida popularmente como el ***corte con flama***, usa el calor de combustión de ciertos gases combinado con la reacción exotérmica del metal con el oxígeno. El soplete de corte que se usa en estos procesos está diseñado para proporcionar una mezcla de gas combustible y oxígeno en las cantidades correctas y dirigir una corriente de oxígeno a la región de corte. El mecanismo principal de la remoción de material en el corte con oxígeno y gas combustible (OFC, por sus siglas en inglés) es la reacción química del oxígeno con el metal base. El propósito

de la combustión del oxígeno y el gas es elevar la temperatura en la región de corte para soportar la reacción. Por lo general, estos procesos se usan para cortar placas metálicas ferrosas, en las cuales ocurre una rápida oxidación del hierro de acuerdo con las reacciones siguientes [10]:

$$Fe + O \rightarrow FeO + calor \quad (26.8a)$$

$$3Fe + 2O_2 \rightarrow Fe_3O_4 + calor \quad (26.8b)$$

$$2Fe + 1.5O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + calor \quad (26.8c)$$

La segunda de estas reacciones, mostrada en la ecuación (26.8*b*), es la más importante en términos de generación de calor.

El mecanismo de corte para metales no ferrosos es distinto en cierta forma. En general, estos metales se caracterizan por temperaturas de fusión más bajas que los metales ferrosos y hay más resistencia a la oxidación. En estos casos, el calor de la combustión de la mezcla de oxígeno y gas combustible tiene una función más importante en la creación de la ranura. Asimismo, para promover la reacción oxidante del metal, con frecuencia se añaden flujos químicos o polvos metálicos a la corriente de oxígeno.

Los combustibles usados en el OFC incluyen el acetileno (C_2H_2). El MAPP (metilacetileno-propadieno-C_3H_4), el propileno (C_3H_6) y el propano (C_3H_8). Las temperaturas de flama y de combustión para estos combustibles se enlistan en la tabla 31.2 del capítulo 31. El acetileno se quema a la máxima temperatura de flama y es el combustible de mayor uso para soldar con autógena y cortar. Sin embargo, deben considerarse ciertos riesgos con el almacenamiento y manejo del acetileno (sección 31.3.1).

Los procesos de OFC se realizan en forma manual o con máquina. Los sopletes operados en forma manual se usan para trabajo de reparación, corte de metal desechado, desbastado de protuberancias de fundición en arena y en operaciones similares que generalmente requieren una mínima precisión. Para trabajo de producción, el corte con una flama de máquina permite velocidades mayores y una mejor precisión. Con frecuencia, este equipo se controla en forma numérica para permitir que se corten formas perfiladas.

26.4 MAQUINADO QUÍMICO

El maquinado químico (CHM, por sus siglas en inglés) es un proceso no tradicional en el que ocurre una remoción de materiales mediante el contacto con sustancias de acción química fuerte. Las aplicaciones dentro del proceso industrial empezaron poco después de la Segunda Guerra Mundial en la industria de las aeronaves. El uso de materiales químicos para remover secciones no deseadas de una pieza de trabajo se aplica en varias formas y se han creado términos distintos para diferenciar las aplicaciones. Estos términos incluyen el fresado químico, el preformado químico, el grabado químico y el maquinado fotoquímico (PCM, por sus siglas en inglés). Todos emplean el mismo mecanismo de remoción de material y es conveniente analizar las características generales del maquinado químico antes de definir los procesos individuales.

26.4.1 Mecánica y química del maquinado químico

El proceso de maquinado químico consta de varios pasos. Las diferencias en las aplicaciones y las formas en que se realizan las etapas establecen las diferentes formas del CHM. Los pasos son:

1. ***Limpieza.*** El primer paso es una operación de limpieza para asegurar que el material se remueva en forma uniforme de las superficies que se van a atacar.
2. ***Enmascarado.*** Un recubrimiento protector se aplica a ciertas zonas de la pieza. Este protector está hecho de material químicamente resistente al material de ataque quí-

mico (el término ***resistir*** se usa para el material protector). Por lo tanto, sólo se aplica a aquellas porciones de la superficie de trabajo que no se van a atacar.

3. ***Ataque químico.*** Éste es el paso de remoción de material. La pieza de trabajo se sumerge en un material de ataque químico que afecta aquellas porciones de la superficie de la pieza que no están protegidas. En el método normal de ataque, el material de trabajo (por ejemplo, un metal) se convierte en una sal que se disuelve dentro del material de ataque químico, y posteriormente se remueve de la superficie. Cuando se ha removido la cantidad deseada de material, se retira la parte del material de ataque químico y se enjuaga para detener el proceso.
4. ***Desenmascarado.*** El protector se retira de la pieza.

En el maquinado químico, los dos pasos que implican variaciones significativas en los métodos, materiales y parámetros del proceso son el enmascarado y el ataque químico, es decir, los pasos 2 y 3.

Los materiales protectores incluyen el neopreno, el cloruro de polivinilo, el polietileno y otros polímeros. La protección se consigue por alguno de estos tres métodos: 1) corte y desprendimiento, 2) resistencia fotográfica y 3) resistencia de pantalla. El método de ***corte y desprendimiento*** implica la aplicación del protector sobre toda la pieza, ya sea por inmersión, recubrimiento o rocío. El grosor del protector resultante es de 0.025 a 0.125 mm (0.001 a 0.005 in). Después de que el protector endurece, se corta mediante una navaja para marcar y se desprende de las áreas de la superficie de trabajo que se van a atacar. La operación de corte del protector se realiza a mano, generalmente guiando la navaja con una plantilla. El método de corte y desprendimiento se usa para la manufactura de piezas de trabajo grandes, cantidades de producción bajas y donde la precisión no es un factor crítico. Este método no se aplica para tolerancias más estrechas de ±0.125 mm (±0.005 in), excepto que la técnica se ejecute con mucho cuidado.

Como su nombre lo indica, el método de ***resistencia fotográfica*** (que se abrevia como *fotorresistencia*) usa técnicas fotográficas para realizar el paso de enmascarado. Los materiales enmascarados contienen químicos fotosensibles. Éstos se aplican a la superficie de trabajo y la pieza recubierta se expone a la luz a través de una imagen en negativo de las áreas que se van a atacar. Después, estas áreas protegidas se retiran de la superficie mediante técnicas de revelado fotográfico. Dicho procedimiento deja con material protector la superficie deseada de la pieza y sin protección las áreas restantes que son vulnerables al ataque químico. Por lo general, las técnicas de enmascarado fotorresistente se aplican donde se producen piezas pequeñas en grandes cantidades y se requieren tolerancias estrechas. Esta técnica se aplica para tolerancias más estrechas que ±0.0125 mm (±0.0005 in) [16].

En la técnica ***resistencia de pantalla*** se aplica el protector mediante métodos de serigrafía. En estos métodos, el protector se aplica sobre la superficie de las piezas de trabajo por medio de una malla de seda o acero inoxidable. La malla tiene incrustado un esténcil que protege la aplicación con barniz protector y deja expuestas las áreas que se van a atacar. Así, el protector recubre las áreas de trabajo que no se van a atacar. En general, el método resistencia de pantalla se usa en aplicaciones que se encuentran entre los otros dos métodos de enmascarado, en términos de precisión, tamaño de piezas y cantidades de producción. Con este método de enmascarado pueden obtenerse tolerancias de ±0.075 mm (±0.003 in).

La elección del material de ***ataque químico*** depende del material de trabajo que se va a atacar, la profundidad y la velocidad de remoción de material deseadas, así como los requerimientos de acabado superficial. El material de ataque químico también debe combinarse con un protector que asegure que dicho agente no afecte al protector. En la tabla 26.2 se enlistan algunos de los materiales de trabajo que se maquinan bajo el método de CHM, junto con los materiales de ataque químico que se usan para estos materiales. La tabla también incluye una velocidad de penetración y factores de ataque químico. Estos parámetros se explican a continuación.

Por lo general, las velocidades de remoción de material en el CHM se indican como velocidades de penetración en mm/min (in/min), puesto que la velocidad de ataque químico sobre el material de trabajo se dirige a la superficie. El área de la superficie no afecta la velocidad de penetración. Las velocidades de penetración enlistadas en la tabla 26.2 son valores típicos para los materiales de trabajo y los agentes de ataque químico dados.

TABLA 26.2 Materiales de trabajo y de ataque químico comunes en el CHM, con velocidades de penetración y factores de ataque típicos.

Material de trabajo	Material de ataque químico	Velocidades de penetración		Factor ataque químico
		mm/min	in/min	
Aluminio	$FeCl_3$	0.020	0.0008	1.75
y aleaciones	NaOH	0.025	0.001	1.75
Cobre y aleaciones	$FeCl_3$	0.050	0.002	2.75
Magnesio y aleaciones	H_2SO_4	0.038	0.0015	1.0
Silicio	$HNO_3 : HF : H_2O$	muy lento		ND
Acero dulce	$HCl : HNO_3$	0.025	0.001	2.0
	$FeCl_3$	0.025	0.001	2.0
Titanio	HF	0.025	0.001	1.0
y aleaciones	$HF : HNO_3$	0.025	0.001	1.0

Recopilado de [5], [7] y [16].

ND = Datos no disponibles.

Las profundidades de corte en el maquinado químico son de hasta 12.5 mm (0.5 in) para paneles de aeronaves hechas de placas metálicas. Sin embargo, muchas aplicaciones requieren profundidades de sólo algunas centésimas de milímetro. Junto con la penetración en el trabajo, también ocurre un ataque químico en las regiones laterales situadas bajo el protector, como se ilustra en la figura 26.16. Este efecto se denomina el ***socavado*** y debe considerarse durante el diseño de la máscara para producir un corte que tenga las dimensiones especificadas. Para determinado material de trabajo, el socavado se relacionará directamente con la profundidad del corte. La constante de proporcionalidad para el material se llama factor de ataque químico, y se define como:

$$F_e = \frac{d}{u} \tag{26.9}$$

en donde F_e = factor de ataque químico; d = profundidad de corte, mm (in); y u = socavado, mm (in). Las dimensiones u y d se definen en la figura 26.16. En el maquinado químico, los diferentes materiales de trabajo tienen distintos factores de ataque químico. Algunos valores típicos se presentan en la tabla 26.2. El factor de ataque químico puede usarse para determinar las dimensiones de las áreas de corte en el protector, de manera que se logren las dimensiones especificadas de las áreas por atacar en la pieza.

26.4.2 Procesos de maquinado químico

En esta sección se describirán los principales procesos de maquinado químico: 1) fresado químico, 2) preformado químico, 3) grabado químico y 4) maquinado fotoquímico.

Fresado químico El fresado químico fue el primer proceso de CHM que se comercializó. Durante la Segunda Guerra Mundial, una compañía de aeronaves en Estados Unidos empezó a usar dicho proceso para remover el metal de algunos componentes de las aeronaves. En la actualidad, el fresado químico todavía se utiliza ampliamente en la industria

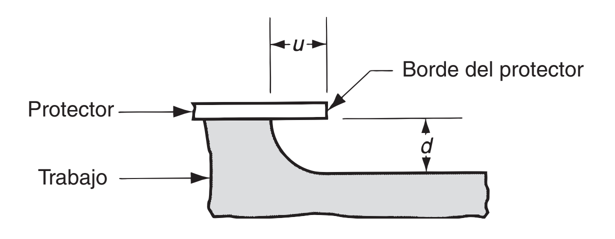


FIGURA 26.16 Socavado en el maquinado químico.

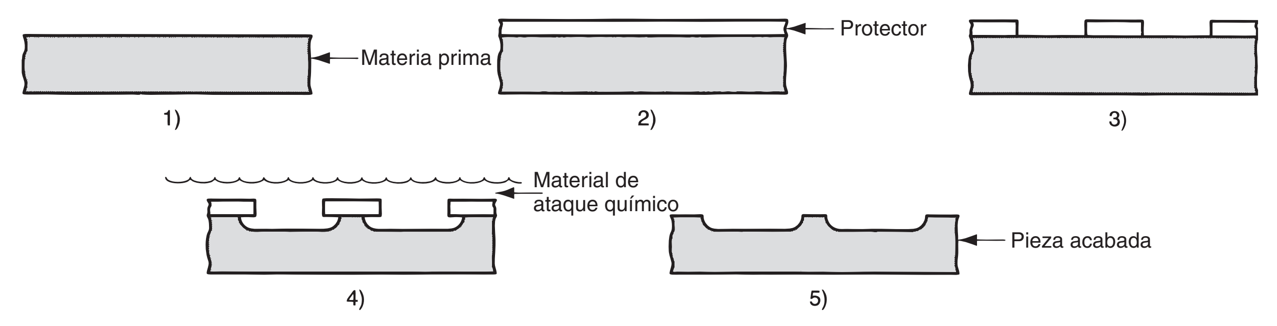


FIGURA 26.17 Sucesión de pasos en el procesamiento por fresado químico: 1) limpieza de la materia prima, 2) aplicación del protector, 3) marcado, corte y desprendimiento del protector de las áreas que se van a atacar, 4) ataque con material químico y 5) remoción del protector y limpieza para obtener una pieza acabada.

aeronáutica para retirar material de paneles de las alas y el fuselaje, con el propósito de reducir el peso. El método es aplicable a piezas grandes, de las cuales se retiran cantidades sustanciales de metal durante el proceso. Se emplea el método de corte y desprendimiento del protector. Por lo general se usa una plantilla, que toma en cuenta el socavado que se producirá durante el ataque químico. La secuencia de los pasos del procesamiento se ilustra en la figura 26.17.

El fresado químico produce un acabado superficial que varía con cada material de trabajo. En la tabla 26.3 se proporciona una muestra de los valores. El acabado superficial depende de la profundidad de penetración. Conforme aumenta la profundidad, empeora el acabado, acercándose al límite superior de los rangos que proporciona la tabla. El daño metalúrgico del fresado químico es muy pequeño, quizá de alrededor de 0.005 mm (0.0002 in) dentro de la superficie de trabajo.

Preformado químico El preformado químico usa la erosión química para cortar piezas de láminas metálicas muy delgadas, con un espesor de hasta 0.025 mm (0.001 in), o para patrones de corte complicados. En ambos ejemplos, los métodos convencionales para perforado y troquelado no funcionan, debido a que las fuerzas de troquelado pueden dañar las láminas metálicas, o el costo de las herramientas es muy alto. El preformado químico produce piezas sin rebabas y aventaja a otras operaciones convencionales de corte.

Los métodos que se usan para aplicar el protector en el preformado químico son la fotorresistencia o la resistencia de pantalla. Para patrones de corte pequeños o complicados, así como para tolerancias estrechas, se usa el método de fotorresistencia; de lo contrario, se usa el método de resistencia de pantalla. Cuando el tamaño de la pieza de trabajo es pequeño, el preformado químico excluye el método de corte y desprendimiento del protector.

La figura 26.18 muestra los pasos del preformado químico mediante el ejemplo del método de resistencia de pantalla. Como en este proceso el ataque químico ocurre en ambos lados de la pieza, es importante que el procedimiento de enmascarado proporcione un

TABLA 26.3 Acabados superficiales esperados en el fresado químico.

	Rango de acabado superficial	
Material de trabajo	μm	μ-in
Aluminio y aleaciones	1.8-4.1	70-160
Magnesio	0.8-1.8	30-70
Acero dulce	0.8-6.4	30-250
Titanio y aleaciones	0.4-2.5	15-100

Recopilado de [7] y [16].

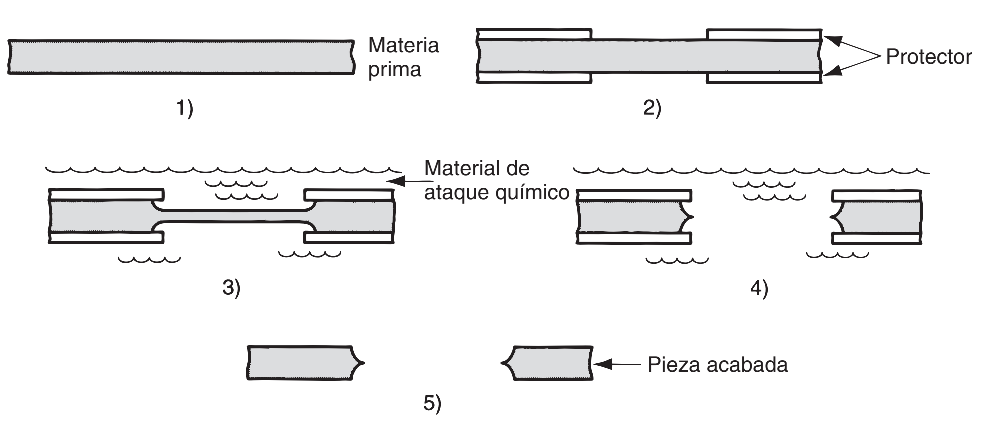


FIGURA 26.18 Sucesión de pasos en el procesamiento por formado químico: 1) limpieza de la materia prima, 2) aplicación del protector a través de la pantalla, 3) ataque químico (parcialmente terminado), 4) ataque químico (terminado), 5) remoción del protector y limpieza para obtener la parte acabada.

registro preciso entre los dos lados. De lo contrario, la erosión de la pieza no podrá alinearse desde direcciones opuestas. Esto resulta especialmente crítico con piezas de tamaño pequeño y patrones complicados.

Por las razones expuestas, la aplicación del preformado químico se limita a materiales delgados o patrones complicados. El grosor máximo de la materia prima es de alrededor de 0.75 mm (0.030 in). Asimismo, es posible procesar materiales endurecidos y frágiles mediante el preformado químico, lo cual sería imposible usando métodos mecánicos porque seguramente se fracturaría el trabajo. En la figura 26.19 se presenta una muestra de piezas producidas por medio del proceso de preformado químico.

Cuando se utiliza el método de fotorresistencia para enmascarar, pueden mantenerse tolerancias tan reducidas como ±0.0025 mm (±0.0001 in) sobre materiales que tengan un grosor de hasta 0.025 mm (0.001 in). Conforme aumenta el grosor de la materia prima, deben permitirse tolerancias más amplias. Los métodos de enmascarado con resistencia de pantalla no son tan precisos como el de fotorresistencia. En consecuencia, cuando se



FIGURA 26.19 Piezas hechas mediante preformado químico. (Foto cortesía de Buckbee-Mears St. Paul.)

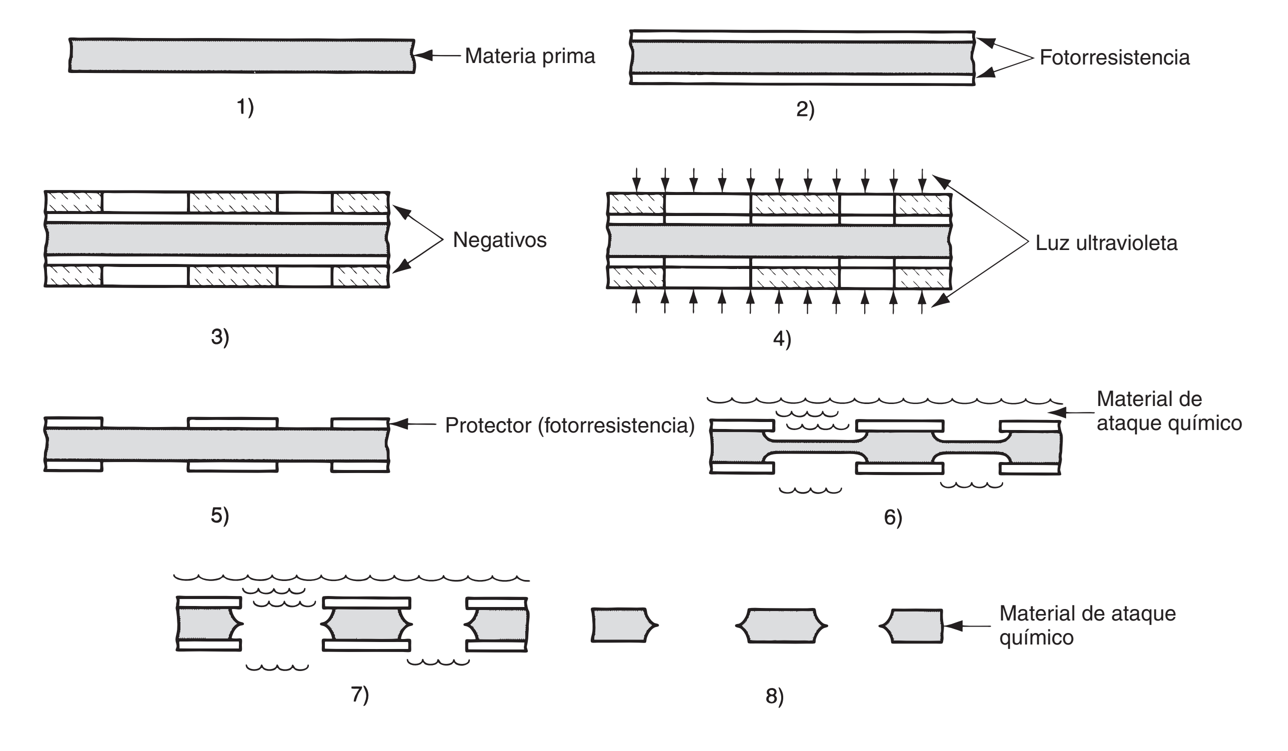
requieren tolerancias estrechas en la pieza, debe usarse el método de fotorresistencia para realizar el paso de enmascarado.

Grabado químico El grabado químico es un proceso de maquinado químico para hacer placas con nombres y otros paneles planos que tienen letras o dibujos en un lado. De otra forma, estas placas y paneles se harían usando una máquina convencional de grabado o un proceso similar. El grabado químico se usa para hacer paneles con las letras bajo relieve o alto relieve, con sólo invertir las partes del enmascarado a las que se va a aplicar el ataque químico. El enmascarado se hace mediante el método de fotorresistencia o por medio de la resistencia de pantalla. La sucesión de pasos para el grabado químico es similar a la de otros procesos de CHM, excepto porque después del ataque con material químico se hace una operación de rellenado. El propósito del rellenado es aplicar pintura u otra protección en las áreas hundidas formadas por el material de ataque químico. Después, el panel se sumerge en una solución que disuelve el protector pero no ataca el material de recubrimiento. Así, cuando se retira el protector, el recubrimiento permanece en las áreas atacadas, con lo que el patrón resalta.

Maquinado fotoquímico En el maquinado fotoquímico (PCM, por sus siglas en inglés), se usa el método de fotorresistencia para enmascarar. Por lo tanto, el término se aplica correctamente al preformado químico y al grabado químico cuando estos métodos usan el método de resistencia fotográfica. El PCM se emplea en el procesamiento de metales cuando se requieren tolerancias cerradas o patrones complicados sobre piezas planas. Los procesos fotoquímicos también se usan ampliamente en la industria de la electrónica para producir diseños de circuitos complicados sobre tarjetas de semiconductores (sección 35.3.1).

En la figura 26.20 se muestra la sucesión de pasos en el maquinado fotoquímico, cuando éste se aplica al preformado químico. Existen varias formas de exponer fotográficamen-

FIGURA 26.20 Sucesión de pasos del procesamiento en el maquinado fotoquímico: 1) limpieza de la materia prima, 2) aplicación de un resistente (protector) por inmersión, pulverización o pintura, 3) colocación de un negativo sobre el resistente, 4) exposición a una luz ultravioleta, 5) revelado para remover el protector sólo en las áreas que se van a atacar, 6) ataque con un material químico (se muestra un efecto parcial), 7) ataque con un material químico (completo), 8) remoción del protector y limpieza para obtener la pieza acabada.



te la imagen deseada sobre la resistencia. La figura muestra el negativo en contacto con la superficie de la resistencia durante la exposición. Ésta es una impresión de contacto, pero existen otros métodos de impresión fotográfica que exponen el negativo a través de un sistema de lentes para ampliar o reducir el tamaño del patrón impreso en la superficie del protector. Los materiales fotoprotectores de uso actual son sensibles a la luz ultravioleta, pero no a la luz de otras longitudes de onda. Por lo tanto, con una iluminación adecuada en la fábrica, no es necesario realizar los pasos del procesamiento en un ambiente de cuarto oscuro. Una vez que se efectúa la operación de enmascarado, los pasos restantes del procedimiento son similares a los de otros métodos de maquinado químico.

En el maquinado fotoquímico, el término que corresponde al factor de ataque químico es ***anisotropía***, que se define como la profundidad del corte d dividida entre el socavado u (véase la figura 26.18). Es la misma definición que en la ecuación (26.9).

26.5 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN

Las aplicaciones típicas de los procesos no tradicionales incluyen las geometrías de piezas con características especiales y los materiales de trabajo que no se procesan con facilidad mediante las técnicas convencionales. En esta sección se examinarán estos aspectos. También se hará un resumen de las características de desempeño generales de los procesos no tradicionales.

Geometría de la pieza de trabajo y materiales de trabajo En la tabla 26.4 se enlistan algunas de las formas de piezas de trabajo especiales, para las que son convenientes los procesos no tradicionales; además se mencionan los procesos no tradicionales que podrían resultar adecuados.

Como grupo, los procesos no tradicionales se aplican a casi todos los materiales de trabajo, tanto metales como no metales. Sin embargo, ciertos procesos no son convenien-

TABLA 26.4 Características geométricas de la pieza de trabajo y procesos no tradicionales adecuados.

Característica geométricas	Proceso adecuado
Orificios muy pequeños. Diámetros menores a 0.125 mm (0.005 in), en algunos casos por debajo de 0.025 mm (0.001 in). Por lo general están por debajo del rango de diámetro para las brocas de taladro convencionales.	EBM, LBM
Orificios cuya relación entre profundidad y diámetro es grande, por ejemplo, $d/D > 20$. Excepto por el taladrado de inyección, estos orificios no pueden maquinarse en las operaciones de taladrado convencionales.	ECM, EDM
Orificios que no son redondos. Los orificios no redondos no pueden taladrarse con una broca de taladro giratorio.	EDM, ECM
Ranuras delgadas en láminas y placas de diferentes materiales. Las ranuras no son necesariamente rectas. En algunos casos, las ranuras tienen formas extremadamente complicadas.	EBM, LBM, WJC, EDM con alambre, AWCJ.
Nanomaquinado. Además de cortar pequeños orificios y ranuras estrechas, hay otras aplicaciones de remoción de materiales donde la pieza de trabajo o las áreas que se van a cortar son muy pequeñas.	PCM, LBM, EBM
Cavidades poco profundas y detalles superficiales en piezas planas. Hay un rango significativo en los tamaños de las piezas para esta categoría, desde chips microscópicos para circuitos integrados hasta grandes paneles para aeronaves.	CHM
Formas con contornos especiales para aplicaciones de moldes y troqueles. En ocasiones estas aplicaciones se denominan como producción de matrices.	

TABLA 26.5 Aplicabilidad de procesos de maquinado no tradicionales seleccionados para diversos materiales de trabajo. En esta recopilación se incluyen el fresado y el esmerilado convencionales, con propósitos de comparación.

	Procesos no tradicionales								Procesos convencionales	
	Mecánicos		Eléctricos		Térmicos			Químicos		
Material de trabajo	USM	WJC	ECM	EDM	EBM	LBM	PAC	CHM	Fresado	Esmerilado
Aluminio	C	C	B	B	B	B	A	A	A	A
Acero	B	D	A	A	B	B	A	A	A	A
Superaleaciones	C	D	A	A	B	B	A	B	B	B
Cerámicas	A	D	D	D	A	A	D	C	D	C
Vidrio	A	D	D	D	B	B	D	B	D	C
Silicio[a]			D	D	B	B	D	B	D	B
Plásticos	B	B	D	D	B	B	D	C	B	C
Tarjeta impresa[b]	D	D	D	D			D	D	D	D
Textiles[c]	D	D	D	D			D	D	D	D

Recopilados de [16] y otras fuentes.

Clave: A = buena aplicación, B = aplicación regular, C = aplicación deficiente, D = no es aplicable. Los espacios en blanco indican que no se encontraron datos disponibles durante la recopilación.

[a]Se refiere al silicio usado en la fabricación de chips de circuitos integrados.

[b]Incluye otros productos de papel.

[c]Incluye fieltro, cuero y materiales similares.

tes para ciertos materiales de trabajo. En la tabla 26.5 se relaciona la aplicabilidad de los procesos no tradicionales a diversos tipos de materiales. Varios de estos procesos pueden usarse sobre metales, pero nunca sobre no metales. Por ejemplo, el ECM, el EDM y el PAM requieren materiales de trabajo que sean conductores eléctricos. Esto generalmente limita su aplicabilidad a piezas metálicas. El maquinado químico depende de la disponibilidad de un material de ataque químico apropiado para el material de trabajo determinado. Como los metales son más susceptibles al ataque químico de ciertos materiales, por lo general se usa el CHM para procesar metales. Con algunas excepciones, es posible usar USM, AJM, EBM y LBM tanto en metales como en no metales. Generalmente, el WJC está limitado al corte de plásticos, cartulinas, textiles y otros materiales que no poseen la resistencia de los metales.

Desempeño de los procesos no tradicionales En general, los procesos no tradicionales se caracterizan por las velocidades bajas en la remoción de material y energías específicas altas, en relación con las operaciones de maquinado convencionales. La capacidad de control de las dimensiones y el acabado superficial de los procesos no tradicionales varían mucho, pues mientras algunos proporcionan una enorme precisión y buenos acabados,

TABLA 26.6 Características del maquinado en los procesos no tradicionales.

	Procesos no tradicionales								Procesos convencionales	
	Mecánicos		Eléctricos		Térmicos			Químicos		
Característica	USM	WJC	ECM	EDM	EBM	LBM	PAC	CHM	Fresado	Esmerilado
Velocidades de remoción de material	C	C	B	C	D	D	A	B-D[a]	A	B
Control de dimensiones	A	B	B	A-D[b]	A	A	D	A-B[b]	B	A
Acabado superficial	A	A	B	B-D[b]	B	B	D	B	B-C[b]	A
Daño superficial[c]	B	B	A	D	D	D	D	A	B	B-C[b]

Recopilado de [16]. Clave: A = excelente, B = bueno, C = regular y D = deficiente.

[a]La valoración depende del tamaño del trabajo y el método de enmascarado.

[b]La valoración depende de las condiciones de corte.

[c]En el daño superficial, una buena calificación significa un daño mínimo y una calificación deficiente significa una profunda penetración que daña la superficie; los procesos térmicos pueden producir un daño de hasta 0.020 in (0.50 mm) bajo la nueva superficie de trabajo.

otros producen acabados y precisiones deficientes. Otra consideración es el daño de las superficies. Algunos de estos procesos producen muy poco daño metalúrgico sobre el material localizado inmediatamente abajo de la superficie de trabajo, mientras que otros (sobre todo los procesos térmicos) causan un daño considerable a las superficies. La tabla 26.6 compara estas características importantes de los procesos no tradicionales, y usa el fresado y el esmerilado de superficies convencionales con propósitos de comparación. El análisis de los datos revela amplias diferencias en las características de maquinado. Al comparar las características de los maquinados no tradicional y convencional no debe olvidarse que los procesos no tradicionales se usan generalmente cuando los métodos convencionales no son prácticos o económicos.

REFERENCIAS

[1] Aronson, R. B., "Waterjets Move into the Mainstream", ***Manufacturing Engineering***, abril de 2005, pp. 69-74.

[2] Bellows, G., y Kohls, J. B., "Drilling without Drills", Special Report 743, ***American Machinist***, marzo de 1982, pp. 173-188.

[3] Bcnedict, G. F., ***Nontraditional Manufacturing Processes***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1987.

[4] Dini, J. W., "Fundamentals of Chemical Milling", Special Report 768, ***American Machinist***, julio de 1984, pp. 99-114.

[5] Drozda, T. J. y C. Wick (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handhook***, 4a ed. Vol. I, ***Machining***. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1983.

[6] Guitrau, E., "Sparking Innovations", ***Cutting Tool Engineering***, vol. 52, núm. 10, octubre de 2000, pp. 36-43.

[7] ***Machining Data Handbook***, 3a ed. Vol. II. Machinability Data Center. Metcut Research Associates Inc., Cincinnati, Ohio, 1980.

[8] Mason, F., "Water Jet Cuts Instrument Panels", ***American Machinist & Automated Manufacturing***, julio de 1988, pp. 126-127.

[9] McGeough, J. A., ***Advanced Methods of Machining***, Chapman and Hall, Londres, Inglaterra, 1988.

[10] O'Brien, R. L., ***Welding Handbook***, 8a. ed. Vol. 2, ***Welding Processes***, American Welding Society, Miami, Florida, 1991.

[11] Pandey, P. C. y Shan, H. S., ***Modern Machining Processes***, Tata McGraw-Hill Publishing Company, Nueva Delhi, India, 1980.

[12] Vaccari, J. A., "The Laser's Edge in Metalworking", Special Report 768, ***American Machinist,*** agosto de 1984, pp. 99-114.

[13] Vaccari, J. A., "Thermal Cutting", Special Report 778. ***American Machinist***, julio de 1988, pp. 111-126.

[14] Vaccari, J. A., "Advances in Laser Cutting", ***American Machinist & Automated Manufacturing***, marzo de 1988, pp.59-61.

[15] Waurzyniak. P., "EDM's Cutting Edge", ***Manufacturing Engineering***, Vol. 123, núm. 5, noviembre de 1999, pp. 38-44.

[16] Weller. E. J. (ed.), ***Nontraditional Machining Processes***. 2a. ed. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

26.1. ¿Por qué son importantes los procesos no tradicionales de remoción de material?

26.2. Existen cuatro categorías de procesos no tradicionales de maquinado basadas en una forma de energía principal. Mencione estas cuatro categorías.

26.3. ¿Cómo funciona el proceso de maquinado ultrasónico?

26.4. Describa el proceso de corte con chorro de agua.

26.5. ¿Cuál es la diferencia entre el corte con chorro de agua, el corte con chorro de agua abrasiva y el corte con chorro abrasivo?

26.6. Mencione los tres tipos principales de maquinado electroquímico.

26.7. Identifique las desventajas importantes del maquinado electroquímico.

26.8. ¿Cómo afecta una descarga creciente de corriente a la velocidad de remoción de metal y al acabado superficial en el maquinado por descarga eléctrica?

26.9. ¿Qué significa el término socavado en el maquinado por descarga eléctrica?

26.10. Identifique dos desventajas importantes del corte con arco de plasma.

26.11. ¿Cuáles son algunos de los combustibles usados en el corte con oxígeno y gas combustible?

26.12. Mencione los cuatro pasos principales en el maquinado químico.

26.13. ¿Cuáles son los tres métodos para ejecutar el paso de la colocación del protector en el maquinado químico?

26.14. ¿Qué es fotorresistencia en el maquinado químico?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

26.1. ¿Cuáles de los siguientes procesos usan energía mecánica como la fuente principal de energía? (tres respuestas correctas): *a*) esmerilado electroquímico, *b*) maquinado con haz láser, *c*) fresado convencional, *d*) maquinado ultrasónico, *e*) corte con chorro de agua y *f*) EDM con alambre.

26.2. El maquinado ultrasónico puede usarse para maquinar materiales tanto metálicos como no metálicos: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

26.3. Las aplicaciones del maquinado con haz de electrones se limitan a los materiales de trabajo metálico debido a la necesidad de que el trabajo sea eléctricamente conductivo: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

26.4. ¿Cuál de las siguientes temperaturas se acerca más a la usada en el corte con arco de plasma? *a*) 2 750 °C (5 000 °F), *b*) 5 500 °C (10 000 °F), *c*), 8 300 °C (15 000 °F), *d*) 11 000 °C (20 000 °F) o *e*) 16 500 °C (30 000 °F).

26.5. ¿Para cuál de las siguientes aplicaciones se usa el fresado químico? (las dos mejores respuestas): *a*) taladrado de orificios con una alta relación entre profundidad y diámetro, *b*) maquinado de patrones complicados en láminas de metal, *c*) remoción de material para hacer cavidades huecas en metal, *d*) remoción de metal en paneles para alas de aeronaves y *e*) corte de hojas de plástico.

26.6. ¿Cuál de los siguientes es un factor de ataque químico en el maquinado químico? (más de una respuesta): *a*) anisotropía, *b*) CIt, *c*) d/u, y *d*) u/d; donde C = velocidad de remoción específica, d = profundidad de corte, I = corriente, t = tiempo y u = socavado.

26.7. De los siguientes procesos, ¿cuál se distingue por las velocidades más altas de remoción de material?: *a*) maquinado por descarga eléctrica, *b*) maquinado electroquímico, *c*) maquinado con haz láser, *d*) corte con oxígeno y gas combustible, *e*) corte con arco de plasma, *f*) maquinado ultrasónico y *g*) corte con chorro de agua.

26.8. ¿Cuál de los siguientes procesos sería adecuado para taladrar un orificio con una sección transversal cuadrada de 0.25 in en un lado y 1 in de profundidad en una pieza de trabajo de acero?: *a*) maquinado con chorro abrasivo, *b*) fresado químico, *c*) EDM, *d*) maquinado con haz láser, *e*) corte con oxígeno y gas combustible, *f*) corte con chorro de agua y *g*) EDM con alambre.

26.9. ¿Cuál de los procesos siguientes sería apropiado para cortar una ranura delgada de menos de 0.015 in de ancho en una hoja de 3/8 de in de grosor de plástico reforzado con fibra? (las dos mejores respuestas): *a*) maquinado con chorro abrasivo, *b*) fresado químico, *c*) EDM, *d*) maquinado con haz láser, *e*) corte con oxígeno y gas combustible, *f*) corte con chorro de agua y *g*) EDM con alambre.

26.10. ¿Cuál de los siguientes procesos sería apropiado para cortar un orificio de 0.003 in de diámetro a través de una placa de aluminio con un grosor de 1/16 de in?: *a*) maquinado con chorro abrasivo, *b*) fresado químico, *c*) EDM, *d*) maquinado con haz láser, *e*) corte con oxígeno y gas combustible, *f*) corte con chorro de agua y *g*) EDM con alambre.

26.11. ¿Cuál de los siguientes procesos podría usarse para cortar en dos secciones una pieza grande de placa de acero de 1/2 de in? (Dos mejores respuestas): *a*) maquinado con chorro abrasivo, *b*) fresado químico, *c*) EDM, *d*) maquinado con haz láser, *e*) corte con oxígeno y gas combustible, *f*) corte con chorro de agua y *g*) EDM con alambre.

PROBLEMAS

Problemas de aplicación

26.1. Para la siguiente aplicación identifique uno o más procesos no tradicionales de maquinado que podrían usarse y presente argumentos para apoyar su selección. Suponga que la geometría de la pieza o el material de trabajo (o ambos) excluyen el uso de maquinado convencional. La aplicación es una matriz de orificios de 0.1 mm (0.004 in) de diámetro en una placa, cuyo grosor es de 3.2 mm (0.125 in) y está hecha de acero para herramienta endurecido. La matriz es rectangular y mide 75 × 125 mm (3.0 × 5.0 in) con una separación entre los orificios en cada dirección = 1.6 mm (0.0625 in).

26.2. Para la siguiente aplicación identifique uno o más procesos no tradicionales de maquinado que podrían usarse y presente argumentos para apoyar su selección. Suponga que la geometría de la pieza o el material de trabajo (o ambos) excluyen el uso de maquinado convencional. La aplicación consiste en realizar un grabado sobre una placa de aluminio para impresión; se utilizará una imprenta de offset para hacer placas de 275 × 350 mm (11 × 14 in) de la arenga de Lincoln en Gettysburgh.

26.3. Para la siguiente aplicación identifique uno o más procesos no tradicionales de maquinado que podrían usarse y presente argumentos para apoyar su selección. Suponga que la geometría de la pieza o el material de trabajo (o ambos) excluyen el uso de maquinado convencional. La aplicación consiste en hacer un orificio de lado a lado en forma de L en una placa de vidrio de 12.5 mm (0.5 in) de espesor. El tamaño de la "L" es de 25 × 15 mm (1.0 × 0.6 in) y la anchura del orificio es de 3 mm (1/8 in).

26.4. Para la siguiente aplicación identifique uno o más procesos no tradicionales de maquinado que podrían usarse y presente argumentos para apoyar su selección. Suponga que la geometría de la pieza o el material de trabajo (o ambos) excluyen el uso de maquinado convencional. La aplicación consiste en realizar un orificio sin salida en forma de la letra G en un cubo de acero de 50 mm (2.0 in). El tamaño de la "G" es de 25 × 19 mm (1.0 × 0.75 in), la profundidad del orificio es de 3.8 mm (0.15 in) y su anchura es de 3 mm (1/8 de in).

26.5. Gran parte del trabajo de la Compañía "Corte cualquier cosa" implica cortar y formar hojas planas de fibra de vidrio para la industria de los botes recreativos. En la actualidad, se usan métodos manuales basados en sierras portátiles para realizar la operación de corte, pero la producción es lenta y la razón de desperdicio es alta. El supervisor dice que la compañía debe invertir en una máquina de corte con arco de plasma, pero el gerente de la planta piensa que sería muy costosa. ¿Qué opina usted? Justifique su respuesta indicando las características del proceso que hace atractivo o no el PAC en esta aplicación.

26.6. Una compañía de muebles que fabrica sillas y sofás tapizados debe cortar grandes cantidades de telas. Muchas de éstas son fuertes y resistentes al desgaste, y tales propiedades las hacen difíciles de cortar. ¿Cuál(es) proceso(s) no tradicional(es) recomendaría a la compañía para esta aplicación? Justifique su respuesta indicando las características del proceso que lo hacen atractivo.

Maquinado electroquímico

26.7. En una operación de ECM, el área de trabajo frontal del electrodo es de 2 000 mm^2. La corriente aplicada = 1 800 amps y el voltaje = 12 volts. El material que se corta es níquel (valencia = 2), cuya velocidad de remoción específica se indica en la tabla 26.1. *a*) Si el proceso es eficiente en 90%, determine la velocidad de remoción de metal en mm^3/min. *b*) Si la resistividad del electrólito = 140 ohm-mm, determine la separación funcional.

26.8. En una operación de maquinado electroquímico, el área de trabajo frontal del electrodo es de 2.5 in^2. La corriente aplicada = 1 500 amps y el voltaje = 12 volts. El material que se corta es aluminio puro, cuya velocidad de remoción específica se indica en la tabla 26.1. *a*) Si el proceso de ECM es eficiente en 90%, determine la velocidad de remoción de metal en in^3/h. *b*) Si la resistividad del electrólito es de 6.2 ohm-in, determine la separación funcional.

26.9. Se maquinará un orificio cuadrado a través de una placa de 20 mm de cobre puro (valencia = 1) utilizando el ECM. El orificio tiene 25 mm en cada lado, pero el electrodo que se usa para cortar el agujero es ligeramente menor de 25 mm en sus lados, con el fin de permitir un socavado, y su forma incluye un orificio en el centro que permite el flujo de material electrolítico y reduce el área de corte. Este diseño de herramienta produce un área frontal de 200 mm^2. La corriente aplicada es de 1 000 amps. Usando una eficiencia de 95%, determine cuánto tiempo se requerirá para cortar el orificio.

26.10. Se cortará un orificio de lado a lado con un diámetro de 3.5 in en un bloque de hierro puro (valencia = 2) mediante maquinado electromecánico. El bloque tiene un grosor de 2.0 in. Para acelerar el proceso de corte, la herramienta de electrodos tendrá un orificio central de 3.0 in, el cual producirá un núcleo central que podrá removerse después de que la herramienta atraviesa la pieza. El diámetro exterior del electrodo tiene un tamaño menor para permitir un socavado. Se espera que el excedente de corte sea de 0.005 in en un lado. Si la eficiencia de la operación de ECM es de 90%, ¿qué corriente se requerirá para terminar la operación de corte en 20 minutos?

Maquinado con descarga eléctrica

26.11. Se realizará una operación de maquinado por descarga eléctrica sobre dos materiales de trabajo: tungsteno y estaño. Determine la cantidad de metal removido en la operación después de una hora con un amperaje de descarga de 20 amperes para cada uno de estos metales. Utilice unidades métricas y exprese las respuestas en mm^3/h. Con base en la tabla 4.1, las temperaturas de fusión del tungsteno y el estaño son de 3 410 °C y 232 °C, respectivamente.

26.12. Se realizará una operación de maquinado por descarga eléctrica sobre dos materiales de trabajo: tungsteno y zinc. Determine la cantidad de metal removido en la operación después de una hora con un amperaje de descarga de 20 amperes para cada uno de estos metales. Utilice unidades de uso común en Estados Unidos y exprese las respuestas en in^3/h. Con base en la tabla 4.1, las temperaturas de fusión del tungsteno y el zinc son de 6 170 °F y 420 °F, respectivamente.

26.13. Suponga que el orificio del problema 26.10 se cortará usando un EDM en lugar de ECM. Usando una corriente de descarga de 20 amperes (lo que sería normal para el EDM), ¿cuánto tiempo se requeriría para cortar el orificio? Con base en la tabla 4.1, la temperatura de fusión del hierro es 2 802 °F.

26.14. Se obtiene una velocidad de remoción de metal de 0.01 in^3/min en cierta operación de EDM sobre una pieza de trabajo de hierro puro. ¿Qué velocidad de remoción de metal se obtendría sobre el níquel en esta operación de EDM si se usara la misma corriente de descarga? Las temperaturas de fusión del hierro y el níquel son de 2 802 °F y 2 651 °F, respectivamente.

26.15. Se realiza una operación de EDM con alambre sobre acero C1080 de 7 mm de espesor, para ello se utiliza como electrodo un alambre de tungsteno cuyo diámetro es de 0.125 mm. La experiencia pasada sugiere que el socavado será de 0.02 mm, de manera que el ancho del canal será de 0.165 mm. Si se usa una corriente de descarga de 10 amperes, ¿cuál es la velocidad de avance permisible que puede usarse en la operación? Estime la temperatura de fusión del acero al

carbono a 0.80% a partir del diagrama de fase de la figura 6.4.

26.16. Se va a realizar una operación de EDM con alambre sobre una placa de aluminio de 3/4 de in de grosor usando un electrodo de alambre de bronce con un diámetro de 0.005 in. Se anticipa que el socavado será de 0.001 in, por lo que la anchura del canal será de 0.007 in. Usando una corriente de descarga de 7 amperes, ¿cuál es la velocidad de avance permisible que se espera usar en la operación? La temperatura de fusión del aluminio es de 1 220 °F.

26.17. Se usa una operación de EDM con alambre para cortar, mediante perforación y fundición, componentes de placas de acero para herramienta cuyo grosor es de 25 mm. Sin embargo, en cortes preliminares el acabado superficial sobre el borde del corte es deficiente. ¿Qué cambios debe hacerse en la corriente de descarga y en la frecuencia de las descargas para mejorar el acabado?

Maquinado químico

26.18. En una planta de fabricación de aviones se usa fresado químico para crear cavidades en ciertas secciones de las alas, las cuales se hacen de una aleación de aluminio. En particular, interesa una pieza de trabajo cuyo grosor inicial es de 20 mm. Se atacará una serie de cavidades con forma rectangular, de 12 mm de profundidad y con dimensiones de 200 mm × 400 mm. Las esquinas de cada rectángulo se extienden hasta 15 mm. La pieza es de una aleación de aluminio, y el material de ataque químico es NaOH. La velocidad de penetración para esta combinación es de 0.024 mm/min, y el factor de ataque químico es de 1.75. Determine *a*) la velocidad de remoción de material en mm^3/min, *b*) el tiempo requerido para atacar hasta la profundidad especificada y *c*) las dimensiones requeridas para la abertura en el corte y para el protector desprendible, de forma que se logre el tamaño de cavidad deseado en la pieza.

26.19. En una operación de fresado químico sobre una placa plana de acero dulce, se desea cortar una cavidad en forma de elipse a una profundidad de 0.4 in. Los semiejes de la elipse son $a = 9.0$ in y $b = 6.0$ in. Se usará una solución de ácidos clorhídrico y nítrico como material de ataque químico. Determine *a*) la velocidad de remoción de metal en in^3/h, *b*) el tiempo requerido para maquinar a esa profundidad y *c*) las dimensiones requeridas de la abertura en el corte y el recubrimiento desprendible requeridos para obtener el tamaño de cavidad que se desea en la pieza.

26.20. En cierta operación de preformado químico se usa el ácido sulfúrico como material de ataque químico para remover material de una lámina hecha de aleación de magnesio. La lámina tiene un grosor de 0.25 mm. Se usó el método de protección de resistencia de pantalla para poder obtener altas velocidades de producción. Resulta que el proceso produce una gran cantidad de desperdicio y no se han alcanzado las tolerancias especificadas de ± 0.025 mm. El supervisor del departamento de CHM se queja de que hay algo incorrecto con el ácido sulfúrico. "Quizá la concentración no sea la correcta", sugiere. Analice el problema y recomiende una solución.

26.21. En una operación de preformado químico, el grosor de la materia prima de la lámina de aluminio es de 0.015 in. El patrón que se va a recortar de la hoja es una matriz de orificios de 0.100 in de diámetro. Si se usa maquinado fotoquímico para cortar estos orificios y se emplea impresión por contacto para hacer el resistente (protector), determine el diámetro de los orificios que deben usarse en el patrón.

Parte VII
Operaciones para la mejora de propiedades y el procesamiento superficial

27 TRATAMIENTO TÉRMICO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los procesos de manufactura cubiertos en los capítulos anteriores involucran la creación de la geometría de una pieza. Ahora se considerarán procesos que mejoran las propiedades de la pieza de trabajo (capítulo 27) o aplican algún tratamiento superficial a la misma, como limpiarla (capítulo 28) o recubrirla (capítulo 29). Las operaciones para la mejora de superficies se realizan con el fin de perfeccionar propiedades mecánicas o físicas del material de trabajo. Éstos no alteran la geometría de la pieza, al menos no de manera intencional. Las operaciones más importantes para la mejora de propiedades son los tratamientos térmicos. El ***tratamiento térmico*** involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios microestructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. Sus aplicaciones más comunes analizadas en este capítulo se realizan sobre metales. Se ejecutan tratamientos similares en vidrio cerámico (sección 7.4.3), vidrios templados (sección 12.3.1) y metales pulverizados y cerámicos (secciones 16.3.3 y 17.2.3).

Pueden realizarse operaciones de tratamiento térmico sobre una pieza de trabajo metálica en varios momentos de su secuencia de manufactura. En algunos casos, el tratamiento se aplica antes del proceso de formado (por ejemplo, para ablandar el metal y así ayudar a formarlo con más facilidad mientras se encuentra caliente). En otros casos, el tratamiento térmico se usa para aliviar los efectos del endurecimiento por deformación que ocurre durante el formado, de manera que el material pueda someterse a una deformación posterior. También, el tratamiento térmico puede realizarse durante la secuencia de manufactura, o casi al finalizar ésta, para lograr la resistencia y dureza requeridas en el producto terminado. Los principales tratamientos térmicos son el recocido, la formación de martensita en el acero, el endurecimiento por precipitación y el endurecimiento superficial.

27.1 RECOCIDO

El ***recocido*** consiste en calentar el metal a una temperatura adecuada, en la cual se mantiene por un cierto tiempo (llamado ***recalentamiento***) y después se enfría lentamente. El recocido se realiza sobre un metal en cualquiera de los siguientes casos: 1) para reducir la dureza y la fragilidad, 2) para alterar la microestructura de manera que puedan obtenerse las propiedades mecánicas deseadas, 3) para ablandar los metales y mejorar su maquinabilidad o formabilidad, 4) para recristalizar los metales trabajados en frío (endurecidos por deformación) y 5) para aliviar los esfuerzos residuales inducidos por los procesos de formado previos. Se usan diferentes términos para el recocido, dependiendo de los detalles del proceso y de la temperatura usada, relativa a la temperatura de recristalización del metal que está bajo tratamiento.

El ***recocido total*** se asocia con metales ferrosos (por lo general, aceros al medio y bajo carbono); el proceso implica calentar la aleación hasta la región austenita seguida de un enfriamiento lento en el horno para producir perlita gruesa. La ***normalización*** implica ciclos similares de calentamiento y recalentamiento, pero las velocidades de enfriamiento son más rápidas. Se permite que el acero se enfríe en aire, a temperatura ambiente. El resultado es perlita fina con una resistencia y dureza más altas pero con una ductilidad más baja que el tratamiento de recocido total.

Con frecuencia, las piezas trabajadas en frío son recocidas para reducir los efectos del endurecimiento por deformación y para incrementar su ductilidad. El tratamiento permite que el metal endurecido por deformación se recristalice de manera completa o parcial, dependiendo de las temperaturas, los periodos de recalentamiento y las velocidades de enfriamiento. Cuando el recocido se realiza para permitir trabajos posteriores sobre la pieza se llama ***proceso de recocido***. Cuando se realiza en toda la pieza (trabajada en frío) para remover los efectos del endurecimiento por deformación, y ésta no va a someterse a ninguna deformación subsecuente, se llama ***recocido***. El proceso en sí es casi el mismo, pero se usan diferentes términos para indicar el propósito del tratamiento.

Si las condiciones de recocido permiten la recuperación total de la estructura de grano original del metal trabajado en frío, entonces ha ocurrido la ***recristalización***. Después de este tipo de recocido, el metal tiene una nueva geometría creada por la operación de formado, pero su estructura de grano y sus propiedades asociadas son esencialmente las mismas que antes del trabajo en frío. Las condiciones que tienden a favorecer la recristalización son una temperatura más alta, un tiempo más largo manteniendo esta situación y una velocidad más baja de enfriamiento. Si el proceso de recocido sólo permite un retorno parcial a la estructura de grano del estado original, se denomina ***recuperación por recocido***. La recuperación permite que el metal retenga la mayoría del endurecimiento por deformación, obtenido durante el trabajo en frío, pero la tenacidad de la pieza se mejora.

Las operaciones de recocido anteriores se ejecutan primordialmente para lograr otras funciones además del alivio de los esfuerzos. Sin embargo, el recocido se realiza algunas veces sólo para aliviar los esfuerzos residuales en la pieza de trabajo causados por los procesos de formado previos. Estos tratamientos, denominados ***recocido para el alivio de esfuerzos***, ayudan a reducir la distorsión y las variaciones dimensionales que pudieran resultar en las piezas que fueron sometidas a esfuerzos.

27.2 FORMACIÓN DE MARTENSITA EN EL ACERO

El diagrama de fases hierro-carbono de la figura 6.4 indica las fases del hierro y el carburo de hierro (cementita) presentes bajo condiciones de equilibrio. Se supone que el enfriamiento desde una temperatura alta ha sido lo suficientemente lento para permitir que la austenita se descomponga en una mezcla de ferrita y cementita (Fe_3C) a temperatura ambiente. Esta reacción de descomposición requiere de difusión y otros procesos que

dependen del tiempo y la temperatura para transformar el metal a su forma final preferida. Sin embargo, bajo condiciones de enfriamiento rápido, de manera que se evita el equilibrio de la reacción, la austenita se transforma en una fase de no equilibrio llamada martensita. La ***martensita*** es una fase dura y frágil que da al acero su capacidad única de endurecerse a valores muy altos. El video clip sobre tratamiento térmico proporciona una visión general del tratamiento térmico del acero.

27.2.1 Curva tiempo-temperatura-transformación

La naturaleza de la transformación a martensita puede entenderse mejor usando la curva tiempo-temperatura-transformación (curva TTT) para acero eutectoide ilustrada en la figura 27.1. La curva TTT muestra cómo la velocidad de enfriamiento afecta la transformación de austenita en varias fases posibles. Las fases pueden dividirse en 1) formas alternativas de ferrita y cementita y 2) martensita. El tiempo se representa (logarítmicamente por conveniencia) a lo largo del eje horizontal y la temperatura en el eje vertical. La curva se interpreta a partir del tiempo cero en la región austenita (en un lugar por encima de la línea de temperatura A_1 para una composición dada) y continúa hacia abajo y a la derecha a lo largo de una trayectoria que muestra cómo se enfría el metal en función del tiempo. La curva TTT que se muestra en la figura es para una composición específica de acero (0.80% de carbono). La forma de la curva es diferente para otras composiciones.

A velocidades lentas de enfriamiento, la trayectoria pasa a través de la región, lo que indica una transformación en perlita o bainita que son formas alternativas de mezclas ferrita-carburo. Como estas transformaciones toman tiempo, el diagrama TTT muestra dos líneas: el inicio y el fin de la transformación conforme transcurre el tiempo, indicando las diferentes regiones de fase por los subíndices *s* y *f*, respectivamente. *La* ***perlita*** es una mezcla de fases ferrita y carburo en la forma de placas delgadas paralelas. Se obtiene por enfriamiento lento de la austenita, de manera que la trayectoria de enfriamiento pase a

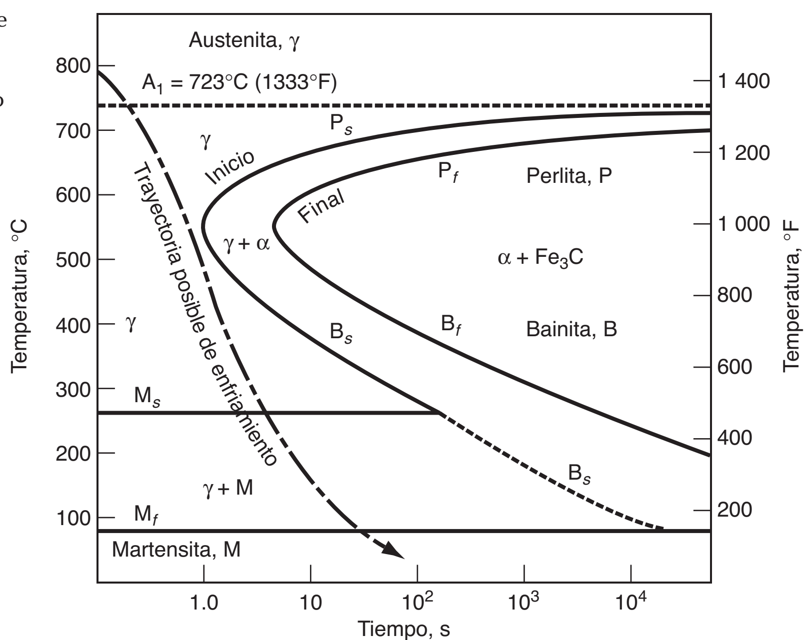


FIGURA 27.1 Curva TTT, que muestra la transformación de austenita en otras fases como una función del tiempo y la temperatura para una composición de cerca de 0.80% de acero-carbono. La trayectoria de enfriamiento mostrada aquí produce martensita.

través de P_s arriba de la "nariz" de la curva TTT. La ***bainita*** es una mezcla alternativa de las mismas fases, que puede producirse mediante un enfriamiento inicial rápido a una temperatura por encima de M_s, de manera que se evite la nariz de la curva TTT; de esto sigue un enfriamiento mucho más lento para pasar a través de B_s y dentro de la región ferrita-carburo. La bainita tiene una estructura en forma de agujas o plumas que consiste en finas regiones de carburo.

Si el enfriamiento ocurre a una velocidad suficientemente rápida (indicada por la línea punteada en la figura 27.1), la austenita se transforma en martensita. La ***martensita*** es una fase única que consiste en una solución hierro-carbono cuya composición es igual a la de la austenita de donde se deriva. La estructura cúbica centrada en la cara de la austenita se transforma casi instantáneamente en la estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) de la martensita, sin que ocurra el proceso de difusión, el cual está en función del tiempo y es necesario para separar la ferrita y el carburo de hierro en las transformaciones precedentes.

Durante el enfriamiento, la transformación de la martensita empieza a cierta temperatura M_s y termina a una temperatura más baja M_f, como se muestra en el diagrama TTT. En los puntos entre estos dos niveles, el acero es una mezcla de austenita y martensita. Si se detiene el enfriamiento a una temperatura entre las líneas M_s y M_f, la austenita se transformará en bainita en cuanto la trayectoria tiempo-temperatura cruce el umbral de B_s. El nivel de la línea M_s es influido por los elementos de la aleación, incluido el carbono. En algunos casos, la línea M_s se cae por debajo de la temperatura ambiente, lo que hace imposible para estos aceros la formación de martensita mediante métodos de tratamiento térmico tradicional.

La dureza extrema de la martensita es consecuencia de la deformación reticular creada por los átomos de carbono atrapados en la estructura BCT, que forman una barrera al deslizamiento. En la figura 27.2 se muestra el efecto significativo que tiene la martensita sobre la transformación de la dureza del acero, al incrementar el contenido de carbono.

27.2.2 Procesos del tratamiento térmico

El tratamiento térmico para formar martensita consiste en dos pasos: austenitización y enfriamiento por inmersión. Con frecuencia, después de estos pasos sigue un templado para producir martensita templada. La ***austenitización*** implica calentamiento del acero

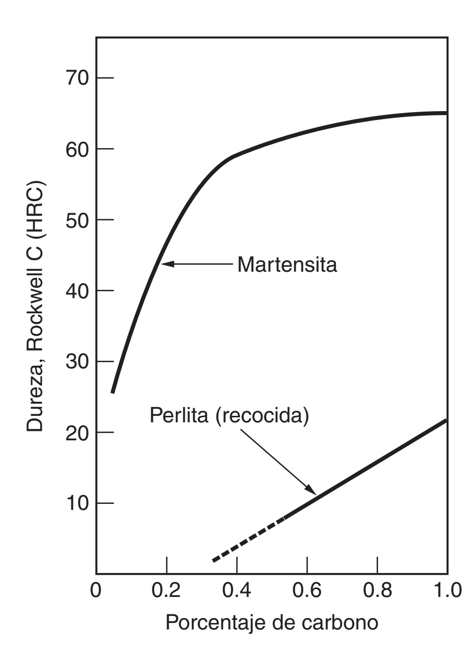


FIGURA 27.2 La dureza del acero al carbono como una función del contenido de carbono en la martensita (endurecida) y la perlita (recocida).

a una temperatura lo suficientemente alta para convertirse entera o de manera parcial en austenita. Esta temperatura puede determinarse por medio del diagrama de fases para la composición particular de la aleación. La transformación a austenita implica un cambio de fase que requiere tiempo y calentamiento. En consecuencia, el acero debe mantenerse a una temperatura elevada por un periodo suficiente de tiempo para permitir que se forme la nueva fase y se logre la homogeneidad de composición requerida.

El paso de ***enfriamiento por inmersión*** implica que el enfriamiento de la austenita sea lo suficientemente rápido para evitar el paso a través de la nariz de la curva TTT, como se indica en la trayectoria de enfriamiento de la figura 27.1. La velocidad de enfriamiento depende del medio de inmersión y de la velocidad de transmisión de calor dentro de la pieza de acero. Se usan varios medios de inmersión en las operaciones comerciales de tratamiento térmico que incluyen: 1) salmuera —agua salada, generalmente agitada—; 2) agua dulce —destilada, no agitada—; 3) aceite destilado y 4) aire. La inmersión en salmuera agitada proporciona el enfriamiento más rápido de las superficies calentadas de la pieza, mientras que el temple al aire es el más lento. El problema es que mientras más efectivo sea el medio de inmersión en el enfriamiento, es más probable que cause esfuerzos internos, distorsión y grietas en el producto.

La velocidad de transferencia de calor dentro de la pieza depende en gran medida de su masa y su geometría. Una forma cúbica grande se enfriará mucho más despacio que una lámina delgada pequeña. El coeficiente de conductividad térmica k de la composición particular también es un factor en el flujo de calor en el metal. Hay una considerable variación en k para diferentes grados de acero; por ejemplo, el acero al bajo carbono tiene un valor típico de k igual a 0.046 J/s-mm-°C (2.2 Btu/h-in-°F), mientras que un acero de alta aleación debería tener una tercera parte de este valor.

La martensita es dura y frágil. El ***templado*** es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros endurecidos para reducir su fragilidad, incrementar su ductilidad y tenacidad y aliviar los esfuerzos en la estructura de la martensita. El tratamiento implica calentamiento y mantenimiento a una temperatura por debajo de la eutectoide durante aproximadamente una hora, seguido de un enfriamiento lento. El resultado es la precipitación de partículas muy finas de carburo de la solución martensítica hierro-carbono y la transformación gradual de la estructura cristalina de BCT a BCC. Esta nueva estructura se llama ***martensita templada***. Una ligera reducción en resistencia y dureza producen una mejora en ductilidad y tenacidad. La temperatura y el tiempo del tratamiento de templado controlan el grado de suavización del acero endurecido, ya que el cambio de la martensita no templada a la templada implica difusión.

En conjunto, los tres pasos del tratamiento térmico del acero para formar martensita templada pueden representarse como se muestra en la figura 27.3. Hay dos ciclos de calentamiento y enfriamiento, el primero para producir martensita y el segundo para templarla.

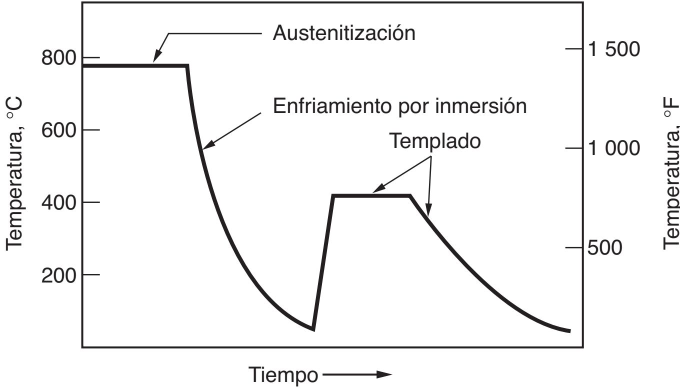
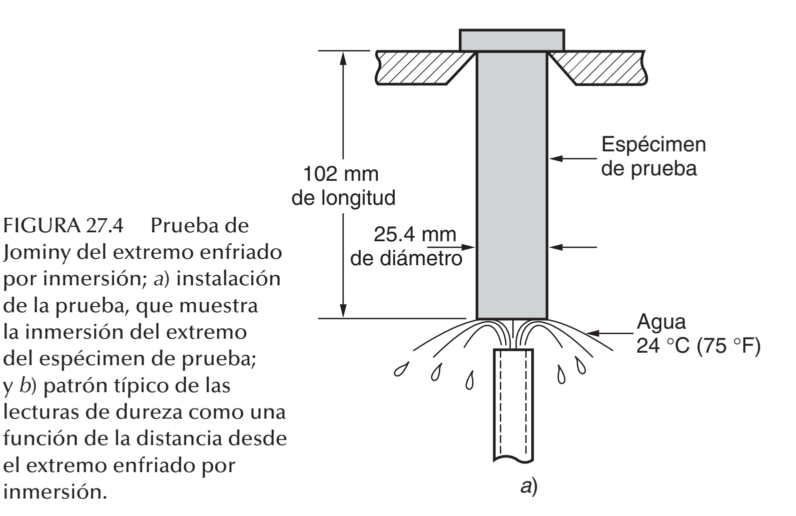


FIGURA 27.3 Tratamiento térmico típico del acero: austenitización, enfriamiento por inmersión y templado.



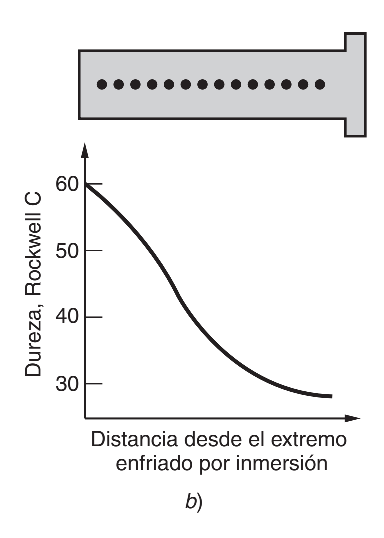


FIGURA 27.4 Prueba de Jominy del extremo enfriado por inmersión; *a*) instalación de la prueba, que muestra la inmersión del extremo del espécimen de prueba; y *b*) patrón típico de las lecturas de dureza como una función de la distancia desde el extremo enfriado por inmersión.

27.2.3 Templabilidad

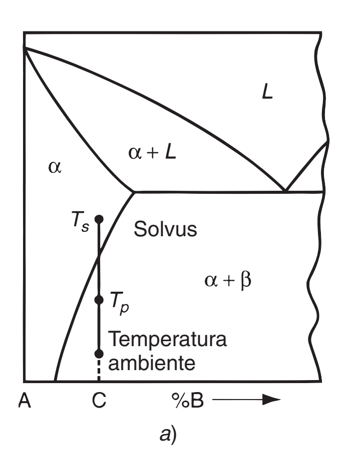
El término ***templabilidad*** se refiere a la capacidad relativa de un acero de ser endurecido por transformación a martensita. Es una propiedad que determina la profundidad por debajo de la superficie enfriada por inmersión a la cual el acero se endurece o la severidad de la inmersión requerida para lograr una cierta penetración de la dureza. Los aceros con buena templabilidad pueden endurecerse más profundamente debajo de la superficie y no requieren altas velocidades de enfriamiento. La templabilidad no se refiere a la máxima dureza que se puede lograr en el acero; eso depende del contenido de carbono.

La templabilidad de un acero se incrementa mediante la aleación. Los elementos aleantes que tienen el mayor efecto son el cromo, el manganeso, el molibdeno (y el níquel en menor grado). El mecanismo con el cual operan estos elementos aleantes es el aumento del tiempo antes de que inicie la transformación de austenita a perlita en el diagrama TTT. En efecto, la curva TTT se mueve hacia la derecha, lo que permite velocidades de enfriamiento más lentas durante la inmersión. Por lo tanto, la trayectoria del enfriamiento es capaz de seguir con mayor facilidad una trayectoria más lenta hacia la *línea* M_s, con lo que evita el obstáculo impuesto por la nariz de la curva TTT.

El método más común para medir la templabilidad es la **prueba de *Jominy del extremo enfriado por inmersión*.** La prueba involucra el calentamiento de un espécimen estándar de diámetro de 25.4 mm (1.0 in) y longitud de 102 mm (4.0 in) dentro del rango de la austenita, y después la inmersión de uno de sus extremos en agua fría mientras se sostiene en posición vertical, como se muestra en la figura 27.4*a*). La velocidad de enfriamiento en el espécimen de prueba disminuye con el incremento de la distancia desde el extremo que se enfría por inmersión. La templabilidad está indicada por la dureza del espécimen como una función de la distancia desde el extremo enfriado por inmersión, como se muestra en la figura 27.4*b*).

27.3 ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN

El ***endurecimiento por precipitación*** implica la formación de finas partículas (precipitados) que actúan para bloquear el movimiento de las dislocaciones y hacer más resistente y duro al metal. Es el principal tratamiento térmico para hacer resistentes las aleaciones de aluminio, cobre, magnesio, níquel y otros metales no ferrosos. El endurecimiento por precipitación puede usarse también para hacer resistentes las aleaciones de acero que no pueden formar martensita por medio del método usual.



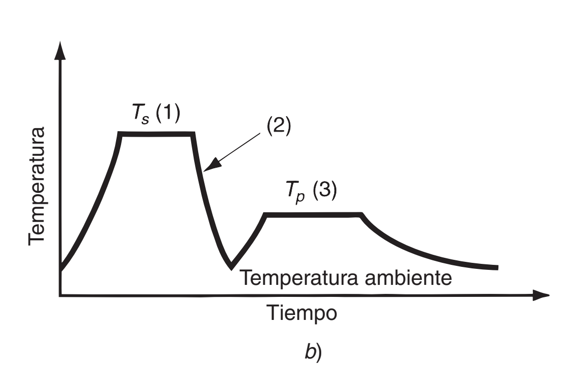


FIGURA 27.5 Endurecimiento por precipitación *a*) diagrama de fase de un sistema de aleación consistente en los metales A y B que pueden ser endurecidos mediante precipitación; y *b*) tratamiento térmico: 1) tratamiento de la solución, 2) enfriamiento por inmersión y 3) tratamiento de precipitación.

La condición necesaria que determina si un sistema de aleación puede ser endurecido por precipitación es la presencia de una línea inclinada de solvus, como se muestra en el diagrama de fase de la figura 27.5*a*). Una composición que puede endurecerse por precipitación es aquella que contiene dos fases a temperatura ambiente, pero que se puede calentar a una temperatura tal que disuelva la segunda fase. La composición C que se muestra en la figura satisface este requerimiento. El proceso de tratamiento térmico consiste en tres pasos, los cuales se ilustran en la figura 27.5*b*): 1) ***tratamiento de la solución***, en el cual se calienta la aleación a la temperatura T_s arriba de la línea solvus dentro de la región de la fase alfa y se sostiene por un periodo suficiente para disolver la fase beta; 2) ***enfriamiento por inmersión*** a temperatura ambiente para crear una solución sólida sobresaturada y 3) ***tratamiento por precipitación***, en el cual se calienta la aleación a una temperatura T_p, por debajo de T_s, para ocasionar la precipitación de partículas finas de la fase beta. Este tercer paso se llama ***envejecimiento***, y por esta razón algunas veces se le llama al proceso entero ***endurecimiento por envejecimiento***. Sin embargo, el envejecimiento puede ocurrir en algunas aleaciones a temperatura ambiente, y así el término ***endurecimiento por precipitación*** resulta más adecuado para los tres pasos del proceso de tratamiento térmico que se analiza aquí. Cuando el paso de envejecimiento se realiza a temperatura ambiente se usa el término ***envejecimiento natural***. Cuando se realiza a una temperatura elevada, como se muestra en la figura, a menudo se usa el término ***envejecimiento artificial***.

Durante el paso de envejecimiento se logra una alta resistencia y dureza en la aleación. La combinación de tiempo y temperatura en el proceso de precipitación (envejecimiento) es crítica para lograr las propiedades deseadas en la aleación. A temperaturas elevadas en el tratamiento por precipitación, como en la figura 27.6*a*), la dureza se eleva en un tiempo relativamente corto; mientras que a temperaturas más bajas, como en *b*), se requiere más tiempo para endurecer la aleación, pero su máxima dureza será probablemente más grande que en el primer caso. Como se observa en la gráfica, la continuación del proceso de

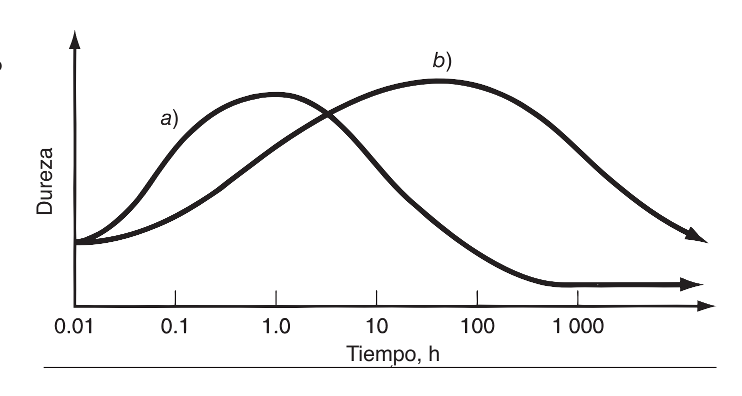


FIGURA 27.6 Efecto de la temperatura y el tiempo durante el tratamiento por precipitación (envejecimiento): *a*) alta temperatura de precipitación y *b*) baja temperatura de precipitación.

envejecimiento da por resultado una reducción en las propiedades de dureza y resistencia. A esta reducción se le llama ***sobrenvejecimiento***. El efecto global es similar al del recocido.

27.4 ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

El endurecimiento superficial se refiere a cualquiera de los varios tratamientos termoquímicos aplicados al acero en los cuales la composición de la superficie de la pieza se altera por la adición de carbono, nitrógeno u otros elementos. Los tratamientos más comunes son: carburización, nitruración y carbonitruración. Por lo general, estos procesos se aplican a las piezas de acero de bajo carbono para lograr una corteza exterior dura resistente al desgaste al mismo tiempo que se retiene un núcleo tenaz. A menudo, se usa el término ***endurecimiento superficial*** para denominar este tratamiento.

Carburización La carburización es el tratamiento de endurecimiento superficial más común. Implica el calentamiento de una pieza de acero al bajo carbono en presencia de un medio rico en carbono, de manera que el C se difunda en la superficie. En efecto, la superficie se convierte en un acero al alto carbono, con una dureza más alta que la del núcleo de bajo carbono. El entorno rico en carbono puede crearse de varias formas. Un método consiste en el uso de materiales carbonáceos, como carbón vegetal o coque, que se empacan en un recipiente cerrado junto con las piezas. Este proceso se llama ***carburización en caja***, y produce una capa relativamente gruesa en la superficie de la pieza, cuyos valores fluctúan aproximadamente entre 0.6 y 4 mm (0.025 y 0.150 in). Otro método, llamado ***carburización gaseosa***, usa hidrocarburos combustibles, como el propano (C_3H_8) dentro de un horno sellado para difundir el carbono dentro de las piezas. El grosor de la corteza en este tratamiento es delgado, de 0.13 a 0.75 mm (0.005 a 0.030 in). Otro proceso es la ***carburización líquida***, el cual emplea un baño de sal fundida que contiene cianuro de sodio (NaCN), cloruro de bario ($BaCl_2$) y otros componentes para difundir el carbono en el acero. Este proceso produce un espesor de la capa superficial que fluctúa entre el de los otros dos tratamientos. Las temperaturas típicas de carburización están entre 875° y 925 °C (1 600° y 1 700 °F), dentro del rango de la austenita.

La carburización seguida de un enfriamiento por inmersión produce un endurecimiento de la superficie alrededor de HRC = 60. Sin embargo, debido a que las regiones internas de la pieza consisten en acero al bajo carbono, y a que su templabilidad es baja, no le afecta la inmersión y permanece relativamente tenaz y dúctil para soportar los impactos y los esfuerzos por fatiga.

Nitruración La nitruración es un tratamiento mediante el cual se difunde nitrógeno en las superficies de los aceros de aleación especial, para producir una delgada capa dura sin enfriar por inmersión. Para una mayor efectividad, el acero debe contener ciertos elementos aleantes tales como aluminio (0.85 a 1.5%) o cromo (5% o más). Estos elementos forman nitruros que precipitan como partículas muy finas en la superficie del acero endurecido. Los métodos de nitruración incluyen: la ***nitruración gaseosa***, en la cual las piezas de acero se calientan en una atmósfera de amoniaco (u otra mezcla gaseosa rica en nitrógeno); y la ***nitruración líquida*** en la cual las piezas se sumergen en sales de cianuro fundidas. Ambos procesos se llevan a cabo a temperaturas de alrededor de 500 °C (950 °F). El espesor de la corteza va desde 0.025 mm (0.001 in) hasta alrededor de 0.5 mm (0.020 in), con durezas de hasta HRC 70.

Carbonitruración Como su nombre lo indica, la carbonitruración es un tratamiento en el que tanto el carbono como el nitrógeno se absorben en la superficie del acero, por lo general mediante calentamiento en un horno que contiene carbono y amoniaco (NH_3). El espesor de la corteza está normalmente entre 0.07 y 0.5 mm (0.003 y 0.020 in), con durezas comparables con las de los otros dos tratamientos.

Cromizado y borizado Son dos tratamientos adicionales de endurecimiento superficial que, de manera respectiva, difunden cromo y boro en el acero para producir capas que tienen un espesor típico de sólo 0.025 a 0.05 mm (0.001 a 0.002 in). El ***cromizado*** requiere temperaturas más altas y tiempos de tratamiento más largos que los métodos de endurecimiento superficial anteriores, pero la corteza resultante no solamente es dura y resistente al desgaste, sino también resistente al calor y a la corrosión. Por lo general, el proceso se aplica a aceros de bajo carbono. Las técnicas para difundir cromo en la superficie incluyen: el empacado de las piezas de acero con polvos o gránulos ricos en cromo, la inmersión en un baño de sal fundida que contiene Cr y sales de Cr y la deposición de vapores químicos (sección 29.4).

El ***borizado*** se lleva a cabo en aceros de herramienta, aleaciones basadas en níquel y cobalto, y hierros fundidos; también se ejecuta en aceros al carbono, usando polvos, sales o atmósferas gaseosas que contienen boro. El resultado de este proceso es una capa delgada con alta resistencia a la abrasión y un bajo coeficiente de fricción. Las capas endurecidas alcanzan 70 HRC. Cuando se usa el borizado en aceros al bajo carbono y baja aleación, también mejora la resistencia a la corrosión.

27.5 MÉTODOS E INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO

La mayoría de las operaciones de tratamiento térmico se realizan en hornos. Además, hay técnicas que pueden usarse para calentar de manera selectiva la superficie del trabajo o una porción de ella. Por lo tanto, esta sección se divide en dos categorías de métodos e instalaciones para el tratamiento térmico [9]: 1) hornos y 2) métodos selectivos de endurecimiento superficial.

Debe mencionarse que algunos de los equipos descritos aquí se utilizan para otros procesos además de los tratamientos térmicos; éstos incluyen la fundición de metales para colado (sección 11.4.1), calentamiento previo a los trabajos en caliente y medio caliente (sección 18.3), soldadura dura, soldadura blanda y curado de adhesivos (capítulo 32), y procesamiento de semiconductores (capítulo 35).

27.5.1 Hornos para tratamiento térmico

Los hornos varían mucho en cuanto a tecnología, tamaño y capacidad, construcción y control de la atmósfera. Por lo general, calientan las piezas mediante una combinación de radiación, convección y conducción. La tecnología de calentamiento se divide entre los calentados con combustibles y los calentados con electricidad. Los ***hornos calentados con combustibles*** son generalmente ***calentados directamente***, lo cual significa que las piezas de trabajo quedan expuestas directamente a los productos de la combustión. Los combustibles incluyen gases (como el gas natural o el propano) y aceites que pueden atomizarse (como el diesel o el aceite combustible). La química de los productos de combustión puede controlarse al ajustar la mezcla aire-combustible u oxígeno-combustible para minimizar las incrustaciones (formación de óxido) sobre la superficie de trabajo. Los ***hornos eléctricos*** usan una resistencia eléctrica para calentar; son más limpios, silenciosos y proporcionan un calentamiento más uniforme, pero son más caros tanto en su valor de compra como en su operación.

Un horno convencional es un espacio cerrado diseñado para resistir las fugas de calor y adecuarse al tamaño de las piezas a procesar. Los hornos se clasifican en carga por lotes y continuos. Los ***hornos por lotes*** son más simples, consisten básicamente en un sistema de calentamiento dentro de una cámara aislada con una puerta para cargar y descargar las piezas. Ejemplos de este tipo general de horno son los ***hornos de caja,*** que se construyen como cajas rectangulares, disponibles en varios tamaños; ***hornos con carro***, que son mucho más grandes y usan carros tipo ferrocarril para mover piezas grandes en la cámara de calentamiento; y ***hornos tipo campana***, en los cuales la cubierta o campana del horno se puede elevar por medio de una grúa de puente para cargarlo o descargarlo.

Los ***hornos continuos*** se usan generalmente para velocidades de producción más altas y proporcionan un medio para mover el trabajo en el interior de la cámara de calentamiento. Los mecanismos alternativos para transportar el trabajo incluyen configuraciones circulares que utilizan soleras giratorias, y del tipo en línea recta en el cual las piezas se mueven mediante transportadores a través de una o varias cámaras de calentamiento colocadas en línea.

En ciertas operaciones de tratamiento térmico se requieren atmósferas especiales, como en algunos de los tratamientos de endurecimiento superficial que se han analizado. Estas atmósferas incluyen ambientes ricos en carbono o nitrógeno para la difusión de estos elementos en la superficie del trabajo. El control de la atmósfera es conveniente en las operaciones de tratamiento térmico convencional para evitar la oxidación excesiva o la descarburización.

Los ***hornos al vacío*** son capaces de crear un vacío en la cámara de calentamiento y de calentar las piezas por radiación. Una ventaja de estos hornos que se cita frecuentemente es que evitan la oxidación superficial de las piezas de trabajo; esto representa una alternativa atractiva para el control de la atmósfera. La desventaja es el tiempo requerido en cada ciclo para crear el vacío, lo cual reduce la velocidad de producción.

Otros tipos de horno son el de baño de sales y el de cama fluidizada. Los ***hornos de baño de sales*** son recipientes que contienen sales fundidas como cloruros o nitratos. Las piezas a tratar se sumergen en el medio fundido. Los ***hornos de cama fluidizada*** tienen un depósito en el que se encuentran pequeñas partículas inertes suspendidas en una corriente de gases calientes a alta velocidad. Bajo condiciones adecuadas, el comportamiento del conjunto de partículas parece el de un fluido, por lo que ocurre un calentamiento rápido de las piezas sumergidas en esta cama de partículas.

27.5.2 Métodos de endurecimiento superficial selectivo

Con estos métodos se calienta sólo la superficie del trabajo o áreas locales de la superficie de trabajo. Difieren de los métodos de endurecimiento superficial (sección 27.4) en que no ocurren cambios químicos. Aquí los tratamientos son exclusivamente térmicos. Los métodos de endurecimiento superficial selectivo incluyen el endurecimiento por flama, el endurecimiento por inducción, el calentamiento por resistencia a alta frecuencia, el calentamiento por haz de electrones y el calentamiento por haz láser.

Endurecimiento por flama Este método implica el calentamiento del trabajo por medio de uno o más sopletes, seguido de un rápido enfriamiento por inmersión. Como proceso de endurecimiento, se aplica en aceros al carbono y aleados, aceros de herramienta y fundiciones de hierro. Los combustibles incluyen el acetileno (C_2H_2), el propano (C_3H_8) y otros gases. El nombre de endurecimiento por flama sugiere una operación muy manual con una falta general de control sobre los resultados; sin embargo, el proceso puede configurarse incluyendo control de temperatura, fijadores para posicionar el trabajo respecto a la flama y dispositivos indicadores que operan durante ciclos precisos de tiempo, todo lo cual proporciona un estrecho control de los resultados del tratamiento térmico. Es un proceso rápido y versátil que se presta para producciones altas y para componentes grandes, como engranes que exceden la capacidad de los hornos. Con un control adecuado, endurecen sólo las superficies externas sin afectar las partes internas. La profundidad del endurecimiento es de alrededor de 2.5 mm (0.10 in).

Calentamiento por inducción Este método implica la aplicación de energía inducida electromagnéticamente por medio de una bobina de inducción en una pieza de trabajo conductora de electricidad. El calentamiento por inducción es un método ampliamente usado en la industria para procesos como la soldadura dura, la soldadura suave y el curado adhesivo, así como en varios tratamientos térmicos. Cuando se usa para endurecimiento de aceros, el siguiente paso es un enfriamiento por inmersión. En la figura 27.7 se ilustra una disposición típica. La bobina inductora de calentamiento conduce una corriente alterna de alta frecuencia que induce una corriente en la pieza de trabajo encerrada para efectuar el

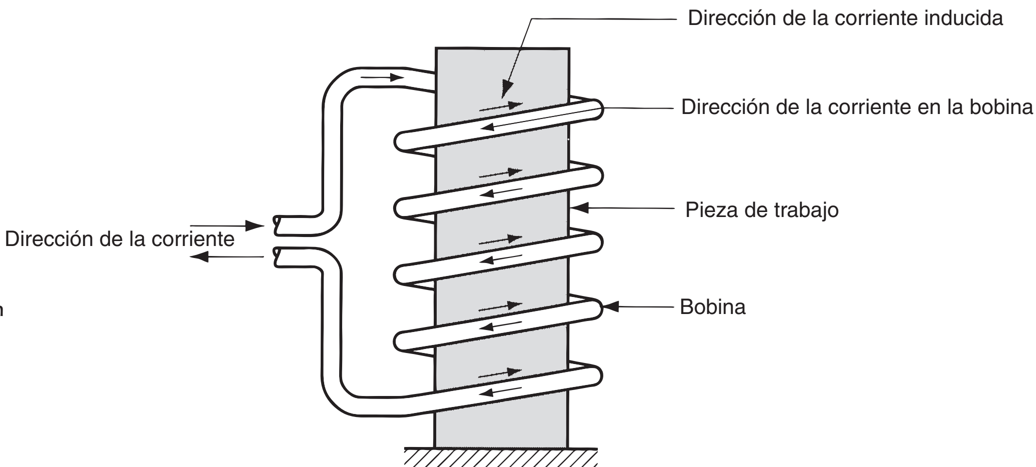


FIGURA 27.7 Configuración típica del calentamiento por inducción. La corriente alterna de alta frecuencia en una bobina induce corriente en la pieza de trabajo para efectuar el calentamiento.

calentamiento. Con este proceso puede calentarse la superficie, una parte de la superficie o la masa entera de la pieza. El calentamiento por inducción proporciona un método rápido y eficiente para calentar cualquier material conductor de la electricidad. Los tiempos del ciclo de calentamiento son cortos; en consecuencia, el proceso se presta para producciones medias o altas.

Calentamiento por resistencia a alta frecuencia (HF, por sus siglas en inglés) Este método se utiliza para endurecer áreas específicas de superficies de trabajo de acero mediante la aplicación de calentamiento por resistencia localizado a altas frecuencias (por lo general 400 khz). En la figura 27.8 se muestra una configuración típica. El aparato consiste en un conductor de proximidad enfriado por agua que se coloca sobre el área que se desea calentar. Los contactos se aplican a la pieza de trabajo en los bordes exteriores del área. Cuando se aplica la corriente HF, la región por debajo del conductor de proximidad se calienta rápidamente a alta temperatura; se requiere menos de un segundo para alcanzar la escala de la austenita. Cuando la alimentación de corriente se detiene, el área, usualmente una línea estrecha como en la figura, se enfría por transferencia de calor al metal circundante. La profundidad del área tratada es de alrededor de 0.63 mm (0.025 in); la dureza depende del contenido de carbono del acero y puede llegar hasta 60 HRC [9].

Calentamiento por haz de electrones (EB, por sus siglas en inglés) La tecnología del haz de electrones (HE) es relativamente nueva en la manufactura. Sus aplicaciones incluyen el corte (sección 26.3.2), la soldadura por fusión (sección 31.4.1) y el tratamiento térmico (que se analiza aquí). La característica atractiva del procesamiento EB es la concentración de altas densidades de energía en una pequeña pieza localizada. El tratamiento térmico EB implica el endurecimiento de superficies localizadas en el acero. El haz de electrones se genera en un cañón EB que se enfoca sobre una pequeña área, y el resultado es una acumulación rápida de calor. A menudo, las temperaturas de austenitización pueden lograrse en menos de un segundo. Cuando se retira el haz dirigido, el área caliente se enfría por inmersión y endurece inmediatamente por transferencia de calor al metal frío circundante.

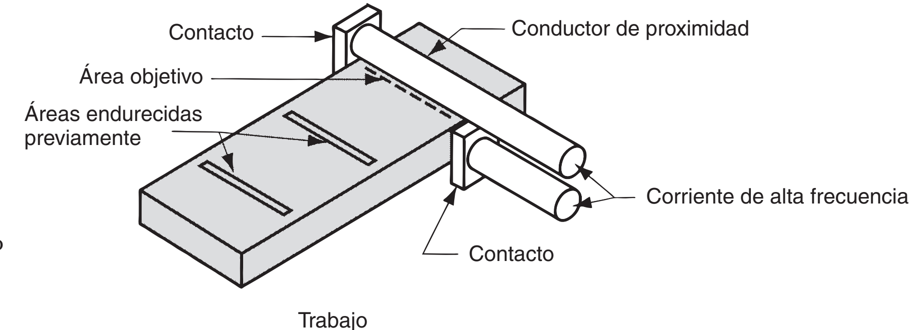


FIGURA 27.8 Disposición típica para el calentamiento por resistencia a alta frecuencia.

Una desventaja del calentamiento por EB (la misma desventaja se aplica a otros usos) es que puede obtenerse mejores resultados cuando el proceso se ejecuta al vacío. Por lo tanto, se necesita una cámara especial de vacío y tiempo para generarlo, de ahí las velocidades lentas de producción. Cuando el endurecimiento por EB se realiza de esta manera se eliminan las incrustaciones de oxidación sobre la superficie de trabajo.

Calentamiento por haz láser (LB, por sus siglas en inglés) Los láseres constituyen otra tecnología nueva, cuyas aplicaciones incluyen corte (sección 26.3.3), soldadura por fusión (sección 31.4.2), medición e inspección (sección 44.5.2) y tratamiento térmico. ***Láser*** es un acrónimo del nombre en inglés de ***l***ight ***a***mplification by ***s***timulated ***e***mission of ***r***adiation (amplificación luminosa de emisiones de radiación estimulada). En el endurecimiento de acero por LB, se enfoca un haz de luz consistente de alta densidad en un área pequeña; el haz se mueve generalmente a lo largo de una trayectoria definida sobre la superficie de trabajo. Esto causa calentamiento del acero dentro de la región austenita. Cuando el haz se cambia de lugar, el área se enfría de inmediato por transferencia de calor al metal circundante. La ventaja del calentamiento por LB sobre el EB es que los láseres no requieren de vacío para lograr mejores resultados. Los niveles de densidad de energía en el calentamiento con EB y LB son más bajos que en el corte o la soldadura por fusión.

REFERENCIAS

[1] Ostwald, P. F. y Munoz, J., ***Manufacturing Processes and Systems***, 9a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1977.

[2] Brick, R. M., Pense, A. W. y Gordon, R. B., ***Structure and Properties of Engineering Materials,*** 4a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1977.

[3] Chandler, H. (ed.), ***Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels***, ASM International, Materials Park, Ohio, 1995.

[4] Chandler, H. (ed.), ***Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Nonferrous Alloys***, ASM International, Materials Park, Ohio, 1996.

[5] Flinn, R. A. y Trojan, P. K., ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[6] Guy, A. G. y Hren, J. J., ***Elements of Physical Metallurgy***, 3a. ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass., 1974.

[7] ***Metals Handbook,*** 9a. ed., Vol. 4. ***Heat Treating***. ASM International, Materials Park, Ohio, 1981.

[8] Vaccari, J. A., "Fundamentals of heat treating", Special Report 737, ***American Machinist,*** septiembre de 1981, pp. 185-200.

[9] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***. 4a. ed. Vol. 3. ***Materials, Finishing, and Coating***; sección 2: Heat Treatment, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

27.1. ¿Por qué se tratan térmicamente los metales?

27.2. Identifique las razones importantes por las que se recuecen los metales.

27.3. ¿Cuál es el tratamiento térmico más importante para endurecer aceros?

27.4. ¿Cuál es el mecanismo mediante el cual el carbono hace más resistente al acero durante el tratamiento térmico?

27.5. ¿Qué información se obtiene de la curva TTT?

27.6. ¿Qué función desempeña el templado?

27.7. Defina templabilidad.

27.8. Mencione algunos de los elementos que tienen el mayor efecto en la templabilidad del acero.

27.9. Indique cómo afecta a la curva TTT la templabilidad de los elementos aleantes del acero.

27.10. Defina qué es endurecimiento por precipitación.

27.11. ¿Cómo funciona la carburización?

27.12. Identifique los métodos de endurecimiento superficial selectivo.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 12 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

27.1. ¿Cuáles de los siguientes son los objetivos comunes del tratamiento térmico? (tres mejores respuestas): *a*) aumentar la dureza, *b*) aumentar la temperatura de fusión, *c*) aumentar la temperatura de recristalización, *d*) reducir la fragilidad, *e*) reducir la densidad y *f*) aliviar los esfuerzos.

27.2. De los siguientes medios de enfriamiento por inmersión, ¿cuál produce la máxima velocidad de enfriamiento? *a*) aire, *b*) salmuera, *c*) aceite o *d*) agua pura.

27.3. ¿Sobre cuál de los siguientes metales puede realizarse el tratamiento llamado austenitización?: *a*) aleación de aluminio, *b*) latón, *c*) aleación de cobre o *d*) acero.

27.4. ¿Cómo se llama al tratamiento mediante el cual se reduce la fragilidad de la martensita? *a*) envejecimiento, *b*) recocido, *c*) austenitización, *d*) normalización, *e*) enfriamiento por inmersión o *f*) templado.

27.5. La prueba Jomini del extremo enfriado por inmersión está diseñada para indicar una de las siguientes opciones, ¿cuál es?: *a*) velocidad de enfriamiento, *b*) ductilidad, *c*) templabilidad, *d*) dureza o *e*) resistencia.

27.6. En el endurecimiento por precipitación, ¿en cuál de los siguientes pasos ocurre el endurecimiento y el fortalecimiento del metal?: *a*) envejecimiento, *b*) enfriamiento por inmersión o *c*) tratamiento de la solución.

27.7. ¿Cuál de los siguientes tratamientos para el endurecimiento superficial es el más común?: *a*) borizado, *b*) carbonitruración, *c*) carburización, *d*) cromizado o *e*) nitruración.

27.8. ¿Cuáles de los siguientes son métodos de endurecimiento superficial selectivo? (tres respuestas correctas): *a*) austenitización, *b*) calentamiento por haz de electrones, *c*) hornos de cama fluidizada, *d*) calentamiento por inducción, *e*) calentamiento por rayo láser o *f*) hornos al vacío.

28 LIMPIEZA Y TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Las piezas de trabajo deben limpiarse una o más veces durante su secuencia de manufactura. Para realizar esta limpieza se usan procesos químicos y mecánicos. Los métodos de limpieza química emplean productos químicos para remover aceites y polvos no deseados en las superficies de las piezas de trabajo. La limpieza mecánica implica la remoción de sustancias de la superficie mediante operaciones mecánicas de diversos tipos. Con frecuencia, estas operaciones tienen otras funciones, como remover rebabas, mejorar la suavidad, agregar lustre y mejorar las propiedades de las superficies. Otros procesos que mejoran las propiedades de las superficies son la difusión y la implantación de iones, los cuales impregnan las superficies de trabajo con átomos de un material ajeno para alterar la química de las superficies y cambiar sus propiedades físicas. Por lo tanto, las funciones principales de los procesos que se analizan en este capítulo son la limpieza de la superficie de trabajo o el mejoramiento de sus propiedades de alguna forma.

28.1 LIMPIEZA QUÍMICA

Una superficie común está cubierta con diversas películas, aceites, suciedad y otros contaminantes (sección 5.2.1). Mientras que algunas de estas sustancias pueden operar en una forma benéfica (como la película de óxido en el aluminio), por lo general resulta deseable remover los contaminantes de las superficies. En esta sección se revisarán algunas consideraciones generales relacionadas con la limpieza y los principales procesos de limpieza química usados en la industria.

Algunas de las razones importantes por las que deben limpiarse las piezas (y productos) manufacturados son: 1) preparar la superficie para un procesamiento industrial posterior, como una aplicación de recubrimiento o una unión pegada; 2) mejorar las condiciones de higiene para los trabajadores y clientes; 3) remover contaminantes que pudieran

reaccionar químicamente con la superficie y 4) mejorar la apariencia y el desempeño del producto.

28.1.1 Consideraciones generales en la limpieza

No existe un método único que pueda usarse para todas las tareas de limpieza. De la misma forma que en el hogar se requieren diferentes jabones y detergentes para distintas labores (lavado de ropa, de platos, pulido de ollas, limpieza de la tina de baño, etcétera), también se requieren distintos métodos para solucionar diferentes problemas de limpieza en la industria. Los factores importantes en la selección de un método de limpieza son: 1) el contaminante que debe removerse, 2) el grado de limpieza requerido, 3) los materiales de los sustratos que van a limpiarse, 4) el propósito de la limpieza, 5) los factores ambientales y de seguridad, 6) el tamaño y la geometría de la pieza y 7) los requerimientos de producción y de costo.

En las superficies de las piezas se acumulan diversos tipos de contaminantes, ya sea debido a un procesamiento anterior o al ambiente de la fábrica. Para seleccionar el mejor método de limpieza, primero debe identificarse lo que se va a limpiar. Por lo general, los contaminantes superficiales que se encuentran en la fábrica se dividen en una de las siguientes categorías: 1) grasa y aceite, entre los cuales están muchos lubricantes usados en el procesado de metales; 2) partículas sólidas tales como virutas de metal, pulimentos abrasivos, suciedad, polvo y materiales similares; 3) compuestos para abrillantado y pulido y 4) películas de óxido, herrumbre e incrustaciones.

El grado de limpieza se refiere a la cantidad de contaminante que queda después de una operación de limpieza dada. Las piezas que se preparan para recibir un recubrimiento (por ejemplo, una capa de pintura o una película metálica) o adhesivo deben estar muy limpias; de lo contrario, se pone en riesgo la adhesión del material de recubrimiento. En otros casos, puede ser deseable que la operación de limpieza deje un residuo en la superficie de la pieza para protegerla contra la corrosión durante el almacenamiento; reemplaza un contaminante en la superficie por otro que es benéfico. Con frecuencia es difícil medir el grado de limpieza en una forma cuantificable. La prueba más simple es el ***método de frotado***, en el cual se frota la superficie con una tela limpia y blanca y se observa la cantidad de manchas que ésta absorbe. Es una prueba no cuantitativa pero sencilla.

La selección de un método de limpieza debe considerar el material de sustrato para no producir reacciones dañinas mediante productos químicos de limpieza. Por citar varios ejemplos: la mayoría de los ácidos y álcalis disuelven el aluminio; el magnesio es atacado por muchos ácidos; el cobre es atacado por los ácidos oxidantes (por ejemplo, el ácido nítrico); los aceros son resistentes a los álcalis, pero reaccionan con casi todos los ácidos.

Algunos métodos de limpieza son convenientes en la preparación de una superficie para pintura, mientras que otros son mejores para el chapeado. La protección ambiental y la seguridad del trabajador se vuelven cada vez más importantes en los procesos industriales. Deben seleccionarse los métodos de limpieza y los materiales químicos asociados para evitar la contaminación y los riesgos a la salud.

28.1.2 Procesos de limpieza química

La limpieza química usa diversos tipos de productos químicos para realizar la remoción de contaminantes superficiales. Los principales métodos de limpieza química son: 1) limpieza alcalina, 2) limpieza con emulsión, 3) limpieza con solventes, 4) limpieza con ácido y 5) limpieza ultrasónica. En algunos casos, la acción química se aumenta mediante otras formas de energía; por ejemplo, la limpieza ultrasónica usa vibraciones mecánicas de alta frecuencia combinadas con limpieza química. En los párrafos siguientes, se analiza cada uno de estos métodos químicos.

Limpieza alcalina Éste es el método de limpieza industrial con un uso más extendido. Como lo indica su nombre, la ***limpieza alcalina*** emplea un álcali para remover aceites, grasa, cera y diversos tipos de partículas (residuos metálicos, sílice, carbono e incrustaciones

ligeras) de una superficie metálica. Las soluciones para limpieza alcalina constan de sales solubles en agua de bajo costo, como el hidróxido de sodio y el de potasio (NaOH, KOH), el carbonato de sodio (Na_2CO_3), el bórax ($Na_2B_4O_7$) y fosfatos y silicatos de sodio y potasio, combinados con dispersantes y suavizantes en agua. Por lo general, la aplicación es mediante inmersión o aspersión, a temperaturas de 50 a 95 °C (120 a 200 °F). Después de la aplicación de la solución alcalina, se usa un enjuague con agua para remover los residuos de álcalis. Las superficies metálicas que se limpian mediante soluciones alcalinas están típicamente trabajadas con galvanoplastia o recubiertas por conversión.

La ***limpieza electrolítica***, también denominada ***electrolimpieza***, es un proceso relacionado en el cual se aplica una corriente directa de 3 a 12 volts a una solución de limpieza alcalina. La acción electrolítica provoca la generación de burbujas de gas en la superficie de las piezas, lo que ocasiona una acción de frotación que ayuda a la remoción de películas de suciedad cohesivas.

Limpieza con emulsión Este método de limpieza usa solventes orgánicos (aceites) dispersos en una solución acuosa. El uso de emulsificantes convenientes (jabones) produce un fluido de limpieza en dos fases (aceite en agua), que funciona mediante la disolución o emulsificación de la suciedad en la superficie de la pieza. El proceso puede usarse sobre piezas metálicas o no metálicas. Después de la limpieza con emulsión debe hacerse una limpieza alcalina para eliminar todos los residuos del solvente orgánico antes de aplicar el chapeado.

Limpieza con solventes En la ***limpieza con solventes***, la suciedad orgánica, como el aceite y la grasa, se remueve de una superficie metálica mediante productos químicos que la disuelven. Las técnicas de aplicación comunes incluyen el frotamiento manual, la inmersión, la aspersión y el desengrasado con vapor. El ***desengrasado con vapor*** usa vapores calientes de solventes para remover aceites y grasas de las superficies de las piezas. Los solventes comunes incluyen el tricloroetileno (C_2HCl_3), el cloruro de metileno (CH_2Cl_2) y el percloroetileno (C_2Cl_4), todos los cuales tienen puntos de ebullición relativamente bajos.[1] El proceso de desengrasado con vapor consiste en calentar el líquido solvente hasta su punto de ebullición en un contenedor para producir vapores calientes. Después, las piezas que van a limpiarse se introducen en el vapor, el cual se condensa sobre la superficie relativamente fría de la pieza, disolviendo los contaminantes que se precipitan al fondo del contenedor. Las bobinas de condensación que se encuentran en la parte alta del contenedor evitan que el vapor escape del tanque hacia la atmósfera circundante. Esto es importante porque los solventes utilizados se clasifican como contaminantes peligrosos para el aire, de acuerdo con el Acta de Aire Limpio de 1992 [5].

Limpieza y baño químico con ácido La ***limpieza con ácido*** remueve aceites y óxidos ligeros de las superficies de metal mediante inmersión aspersión, aplicación con brocha o frotamiento manual. El proceso se realiza a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas. Los fluidos de limpieza comunes son soluciones de ácidos combinadas con solventes mezclables en agua, agentes humectantes o emulsificantes. Los ácidos para limpieza incluyen el clorhídrico (HCl), el nítrico (HNO_3), el fosfórico (H_3PO_4) y el sulfúrico (H_2SO_4); la selección depende del metal base y del propósito de la limpieza. Por ejemplo, el ácido fosfórico produce una película ligera de fosfato en la superficie metálica, la cual es una preparación útil para la aplicación de pinturas.

La diferencia entre la limpieza con ácido y el baño químico con ácido es una cuestión de grado. El ***baño químico con ácido*** implica un tratamiento más severo para remover óxidos, herrumbres e incrustaciones más gruesas; por lo general produce algún ataque químico a la superficie metálica, que sirve para mejorar la adhesión de la pintura orgánica.

Limpieza ultrasónica La limpieza ultrasónica combina la limpieza química y la agitación mecánica del fluido de limpieza para proporcionar un método muy eficaz para la remoción de contaminantes superficiales. Por lo general, el fluido de limpieza es una solución acuosa

[1] El punto de ebullición más alto de los tres solventes es 121 °C (250 °F) para el C_2Cl_4.

que contiene detergentes alcalinos. La agitación mecánica se produce mediante vibraciones de alta frecuencia y amplitud suficiente para ocasionar cavitación, es decir, formación de burbujas o cavidades de vapor a baja presión. Conforme las ondas vibratorias pasan un punto dado en el líquido, la región de baja presión es seguida por un frente de alta presión que implota la cavidad, con lo cual se produce una onda de choque capaz de penetrar las partículas contaminantes adheridas a las superficies de trabajo. Este rápido ciclo de cavitación e implosión ocurre a través del medio líquido, lo cual hace eficaz a la limpieza ultrasónica incluso en formas internas complejas e intrincadas. El proceso de limpieza se realiza a frecuencias de entre 20 y 45 kHz, y la solución de limpieza está a una temperatura elevada, que típicamente se encuentra entre 65 y 85 °C (150 y 190 °F).

28.2 LIMPIEZA MECÁNICA Y PREPARACIÓN SUPERFICIAL

La limpieza mecánica implica la remoción física de suciedad, incrustaciones o películas de la superficie de trabajo de una pieza de trabajo, mediante abrasivos o acciones mecánicas similares. Con frecuencia, los procesos usados para limpieza mecánica sirven para funciones adicionales a la limpieza, como la remoción de rebabas y el mejoramiento del acabado superficial.

28.2.1 Acabado a chorro y granallado

El ***acabado a chorro*** usa el impacto a alta velocidad de partículas para limpiar y acabar una superficie. El más conocido de estos métodos es la ***limpieza con chorro de arena (arenado***), que usa granos de arena (SiO_2) como medio de limpieza; sin embargo, también se utilizan otros medios que incluyen abrasivos duros, como el óxido de aluminio (Al_2O_3) y el carburo de silicio (SiC), y medios suaves, tales como perlas de nylon y cáscaras de nuez trituradas. El medio se impulsa a la superficie objetivo mediante aire a presión o fuerza centrífuga. En algunas aplicaciones, el proceso se ejecuta en estado húmedo, en el cual se dirigen hacia la superficie partículas finas inmersas en una pasta fluida bajo presión hidráulica.

En el ***granallado***, se dirige una corriente a alta velocidad de pequeñas partículas de acero fundido (llamadas ***perdigones***) hacia una superficie metálica con el fin de trabajar en frío e inducir tensiones de compresión sobre las capas superficiales. El granallado se usa primordialmente para mejorar la resistencia a la fatiga de las piezas metálicas. Por lo tanto, su propósito principal es diferente al del acabado a chorro, aunque la limpieza de la superficie se logra como un subproducto de la operación.

28.2.2 Rotación a tambor y otros acabados masivos

La rotación a tambor, el acabado vibratorio y otras operaciones similares comprenden un grupo de procesos de acabado conocidos como métodos de acabado masivo. El ***acabado masivo*** implica el acabado de piezas en conjunto mediante una acción de mezcla dentro de un contenedor, por lo general en presencia de un medio abrasivo. La mezcla provoca que las partes se froten contra el medio y entre sí para obtener la acción de acabado deseada. Los métodos de acabado masivo se usan para remover rebabas, quitar incrustaciones, retirar virutas, pulir uniformemente las curvaturas, bruñir y limpiar. Las piezas incluyen: piezas troqueladas, fundiciones, forjados, extrusiones y piezas maquinadas. Algunas veces, incluso se someten plásticos y piezas cerámicas a estas operaciones de acabado masivo para obtener los resultados deseados. Usualmente, las piezas procesadas mediante estos métodos son pequeñas y no resulta económico acabarlas en forma individual.

Procesos y equipo Los métodos de acabado masivo incluyen la rotación a tambor, el acabado vibratorio y varias técnicas que utilizan fuerza centrífuga. La ***rotación a tambor*** (también llamado ***acabado en barril*** y ***acabado en barril por rotación***) implica el uso de

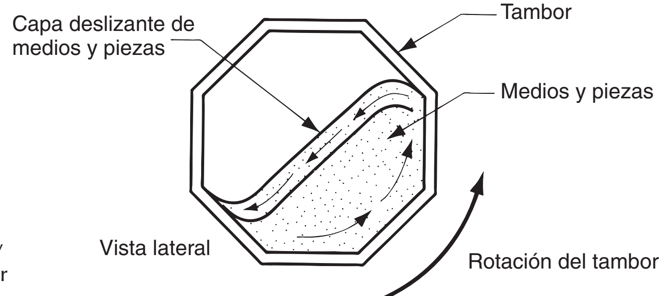


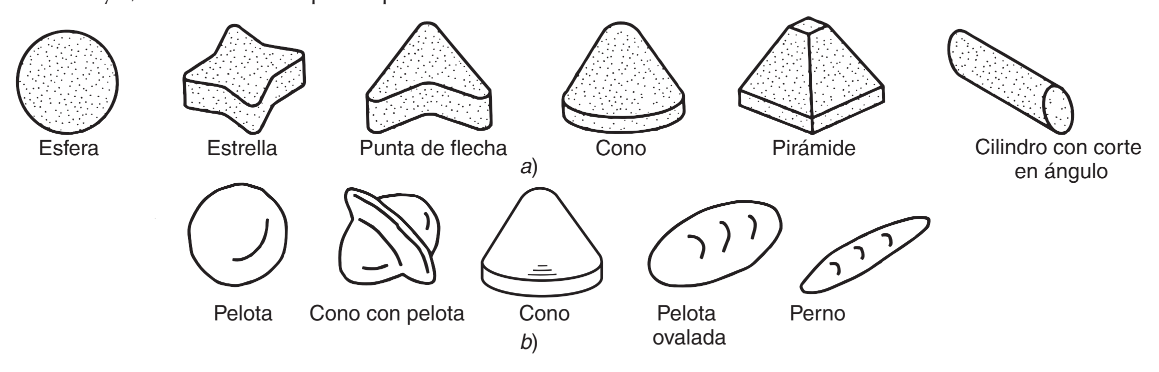
FIGURA 28.1 Diagrama de la operación de rotación a tambor (acabado en barril) que muestra la acción de "movimiento" de las piezas y los medios abrasivos para dar acabado a las piezas.

un tambor orientado en forma horizontal con una sección transversal hexagonal u octagonal, en el cual se mezclan las piezas rotándolo a velocidades entre 10 y 50 rev/min. El acabado se realiza mediante una acción de "movimiento" del medio y las piezas conforme el tambor gira. Como se muestra en la figura 28.1, el contenido se eleva en el tambor debido a la rotación, a lo que le sigue un descenso de la capa superior causado por la gravedad. Este ciclo de ascenso y descenso ocurre en forma continua y, con el tiempo, somete a todas las piezas a la misma operación de acabado deseado. Sin embargo, debido a que sólo la superficie exterior de las piezas recibe el acabado en cualquier momento, este proceso es relativamente lento en comparación con otros métodos de acabado masivo. Con frecuencia se requieren varias horas de rotación a tambor para terminar el procesamiento. Otras desventajas son los altos niveles de ruido y los grandes espacios que se requieren para realizarlo.

El ***acabado vibratorio*** se introdujo a fines de la década de 1950 como una alternativa a la rotación a tambor. El recipiente vibratorio somete a todas las piezas a la agitación con los medios abrasivos y no sólo a la superficie exterior, como en el acabado en tambor. En consecuencia, los tiempos de procesamiento para el acabado vibratorio se reducen considerablemente. Las cubetas abiertas que se usan en este método permiten la inspección de las piezas durante el procesamiento y se reduce el ruido.

Medios La mayoría de los ***medios*** en estas operaciones son abrasivos; sin embargo, algunos medios realizan operaciones de acabado no abrasivas, tales como el pulido y el endurecimiento de superficies. Los medios pueden ser materiales naturales o sintéticos. Los medios naturales incluyen el corindón, el granito, la piedra caliza e incluso la madera dura. El problema con estos materiales es que, por lo general, son más suaves (y por lo tanto se desgastan con mayor rapidez) y su tamaño no es uniforme (y algunas veces se atoran con las piezas de trabajo). Los medios sintéticos pueden hacerse con mayor consistencia, tanto en tamaño como en dureza. Estos materiales incluyen el Al_2O_3 y el SiC, los cuales se compactan en una forma y tamaño deseados usando un material adhesivo como una resina de poliéster. Estos medios tienen formas de esteras, conos, cilindros con corte en ángulo y otras formas geométricas regulares, como en la figura 28.2*a*).

FIGURA 28.2 Formas típicas de medios preformados que se usan en las operaciones de acabado masivo: *a*) medios abrasivos para el acabado y *b*) medios de acero para el pulido.



El acero también se usa como un medio de acabado masivo en formas como las que se muestran en la figura 28.2*b*) para pulido, endurecimiento de superficies y operaciones de remoción de rebabas ligeras. Las formas que se muestran en la figura son de distintos tamaños. La selección de los medios se basa en el tamaño y la forma de las piezas, así como en los requerimientos de acabado.

En la mayoría de los procesos de acabado masivo se usa un compuesto con el medio. El ***compuesto*** de acabado masivo es una combinación de productos químicos para funciones específicas como limpieza, enfriamiento, inhibición de la herrumbre (de piezas y medios de acero), y mejora del brillo y color de las piezas (especialmente en el pulido).

28.3 DIFUSIÓN E IMPLANTACIÓN IÓNICA

En esta sección se analizan dos procesos en los cuales la superficie de un sustrato se impregna con átomos ajenos que alteran sus propiedades.

28.3.1 Difusión

La ***difusión*** implica la alteración de las capas superficiales de un material mediante átomos difusores de un material diferente (por lo general, un elemento) en la superficie (sección 4.3). El proceso tiene importantes aplicaciones en la metalurgia y en la manufactura de semiconductores. El proceso de difusión impregna las capas superficiales del sustrato con el elemento ajeno, pero la superficie todavía contiene una alta proporción del material del sustrato. En la figura 28.3 se ilustra un perfil típico de la composición como una función de la profundidad bajo la superficie, para una pieza metálica recubierta por difusión. La característica de una superficie impregnada por difusión es que el elemento difundido tiene un porcentaje máximo en la superficie y rápidamente declina con la distancia bajo la superficie.

Aplicaciones metalúrgicas de la difusión La difusión se usa para alterar la química superficial de los metales en diversos procesos y tratamientos. Una aplicación importante es el endurecimiento superficial, tipificado por la ***carburación***, la ***nitruración***, la ***carbonitruración***, el ***cromizado*** y el ***borizado*** (sección 27.4). En estos tratamientos se difunden uno o más elementos (C, Ni, Cr, Bo) en las superficies de hierro o acero. El propósito principal de la química superficial alterada es aumentar la dureza y la resistencia al desgaste.

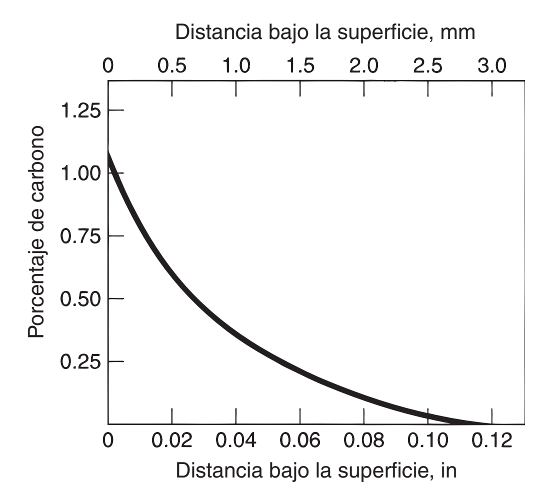


FIGURA 28.3 Perfil característico de un elemento difundido como una función de la distancia bajo la superficie en la difusión. La gráfica que se muestra aquí es para carbono difundido en hierro. (Fuente: [2]).

Existen otros procesos de difusión en los cuales los objetivos principales son la resistencia a la corrosión o la resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Algunos ejemplos importantes son el cromizado (sección 27.4), el aluminizado y el siliconizado. El ***aluminizado*** también se conoce como ***calorizado*** e implica la difusión de aluminio en acero al carbono, aleaciones de aceros y aleaciones de níquel y cobalto. El tratamiento se logra mediante 1) la ***difusión por empaque***, donde las piezas de trabajo se empacan con polvo de aluminio y se hornean a altas temperaturas para crear la capa de difusión, o 2) un ***método de pasta fluida***, en el que las piezas se sumergen en o se someten a la aspersión de una mezcla de polvos de aluminio y aglutinantes; después la pasta se seca y se calienta.

El ***siliconizado*** es un tratamiento de acero en el cual se difunde silicio en la superficie de la parte para crear una capa con buena resistencia a la corrosión y al desgaste y moderar la resistencia al calor. El tratamiento se realiza mediante el calentamiento del trabajo en polvos de carburo de silicio (SiC) en una atmósfera que contiene vapores de tetracloruro de silicio ($SiCl_4$). El siliconizado es menos común que el aluminizado.

Aplicaciones en semiconductores En el procesamiento de semiconductores se usa la difusión de un elemento de impureza en la superficie de un chip de silicio para cambiar las propiedades eléctricas en la superficie, con el propósito de crear dispositivos como transistores y diodos. En el capítulo 35 se examina cómo usar la difusión para realizar este procedimiento, conocido como ***dopado***, y otros procesos con semiconductores.

28.3.2 Implantación iónica

La implantación iónica es una alternativa para la difusión cuando este último método no es factible por las altas temperaturas requeridas. El proceso de implantación iónica implica incorporar átomos de uno o más elementos ajenos en una superficie de substrato, usando un haz de alta energía de partículas ionizadas. El resultado es una alteración de las propiedades químicas y físicas de las capas cerca de la superficie del sustrato. La penetración de átomos produce una capa alterada mucho más delgada que la difusión, como se señala en la comparación de las figuras 28.3 y 28.4. Asimismo, el perfil de concentración del elemento impregnado es diferente a la capa de difusión característica.

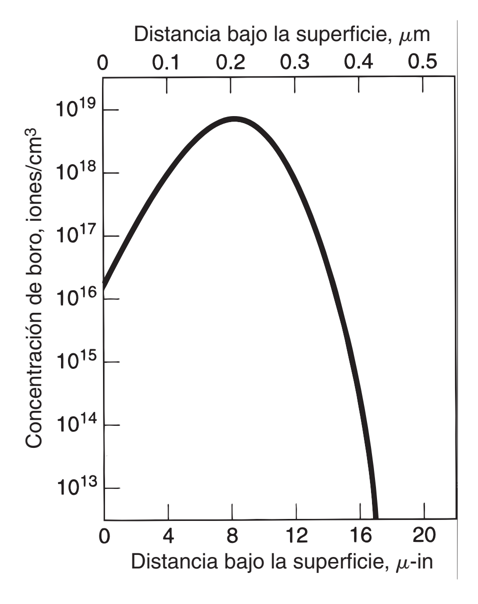


FIGURA 28.4 Perfil de la química de la superficie conforme recibe un tratamiento mediante implantación iónica. (Fuente: [7]). Aquí se muestra una gráfica típica para boro implantado en silicio. Observe la diferencia en la forma y profundidad del perfil de la capa alterada, en comparación con el recubrimiento por difusión de la figura 28.3.

Las ventajas de la implantación iónica incluyen: 1) procesamiento a baja temperatura, 2) buen control y capacidad de reproducir la profundidad de penetración de las impurezas y 3) los límites de solubilidad pueden superarse sin precipitaciones por el exceso de átomos. La implantación iónica es un buen sustituto en aplicaciones para ciertos procesos de recubrimiento, donde sus ventajas incluyen que 4) no hay problemas con la disposición de residuos, como en la galvanoplastia y muchos procesos de recubrimiento y 5) no hay discontinuidad entre el recubrimiento y el sustrato. Las aplicaciones principales de la implantación iónica son la modificación de superficies metálicas para mejorar las propiedades y la fabricación de dispositivos semiconductores.

REFERENCIAS

[1] Freeman, N. B., "A New Look at Mass Finishing", Special Report 757, ***American Machinist***, agosto de 1983, pp. 93 -104.

[2] Hocking, M. G., Vasantasree, V. y Sidky, P. S., ***Metallic and Ceramic Coatings***, Addison-Wesley Longman, Ltd., Reading, Mass., 1989.

[3] ***Metal Finishing,*** Guidebook and Directory Issue. Metals and Plastics Publications. Inc., Hackensack, N. J., 1991.

[4] ***Metals Handbook***, 9a. ed., Vol. 5, ***Surface Cleaning***, ***Finishing, and Coating***. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982.

[5] Sabatka. W., "Vapor Degreasing". www.pfonline.com.

[6] Tucker, Jr., R. C., "Surface Engineering Technologies". ***Advanced Materials & Processes***, abril de 2002, pp. 36-38.

[7] Wick, C. y Veilleux, R. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., Vol. III, ***Materials, Finishes, and Coating.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

28.1. ¿Cuáles son algunas razones importantes por las que deben limpiarse las piezas manufacturadas?

28.2. Los tratamientos mecánicos superficiales se ejecutan con frecuencia por razones diferentes o adicionales a la limpieza. ¿Cuáles son las razones?

28.3. ¿Cuáles son los tipos básicos de contaminantes que deben limpiarse de las superficies metálicas en manufactura?

28.4. Identifique algunos de los métodos de limpieza mecánica.

28.5. Además de la limpieza superficial, ¿cuál es la función principal que se ejecuta mediante el granallado?

28.6. Mencione algunos de los métodos importantes de limpieza química.

28.7. ¿Qué significa el término acabado masivo?

28.8. ¿Cuál es la diferencia entre la difusión y la implantación iónica?

28.9. ¿Qué es el calorizado?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 14 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

28.1. ¿Cuáles de las siguientes son razones por las que deben limpiarse las piezas de trabajo en la industria? (las cuatro mejores respuestas): *a*) evitar la contaminación del aire, *b*) evitar la contaminación del agua, *c*) mejorar la apariencia, *d*) mejorar las propiedades mecánicas de la superficie, *e*) mejorar las condiciones de higiene del trabajador, *f*) mejorar el acabado superficial, *g*) preparar las superficies para procesamiento posterior y *h*) remover contaminantes que podrían atacar químicamente la superficie.

28.2. ¿Cuál de los siguientes productos químicos se asocia con la limpieza alcalina? (más de uno): *a*) bórax, *b*) ácido clorhídrico, *c*) propano, *d*) hidróxido de sodio, *e*) ácido sulfúrico y *f*) tricloroetileno.

28.3. El granallado es un método de limpieza mecánica que se usa principalmente para remover incrustaciones en la superficie de piezas metálicas: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

28.4. ¿Cuál de los siguientes medios abrasivos se usa en la limpieza con chorro de arena?: *a*) Al_2O_3, *b*) cáscaras de nueces trituradas, *c*) cuentas de nylon, *d*) SiC o *e*) SiO_2.

28.5. ¿Cuáles de los siguientes se incluyen entre los medios abrasivos usados en el acabado masivo, como la rotación a tambor? (las tres mejores respuestas): *a*) Al_2O_3, *b*) cáscaras de nueces trituradas, *c*) diamante, *d*) corindón, *e*) esmeralda, *f*) piedra caliza, *g*) NaCl, y *h*) talco.

28.6. ¿Cuáles de los siguientes procesos producen generalmente una penetración más profunda de átomos en la superficie impregnada?: *a*) difusión o *b*) implantación iónica.

28.7. ¿Cuál de los siguientes es igual al método de calorizado? *a*) aluminizado, *b*) dopado, *c*) limpieza con chorro de arena en caliente o *d*) siliconizado.

28.8. ¿Cuál de las siguientes acciones implica la carburación?: *a*) baño químico con ácido, *b*) acabado a chorro, *c*) difusión, *d*) rotación a tambor o *e*) desengrasado con vapor.

29 PROCESOS DE RECUBRIMIENTO Y DEPOSICIÓN

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los productos hechos de metal casi siempre están recubiertos con: pintura, chapeado u otros procesos. Las principales razones para recubrir un metal son: 1) proporcionar protección contra la corrosión, 2) mejorar la apariencia del producto (por ejemplo, para proporcionar un color o una textura especificos, 3) aumentar la resistencia al desgaste y/o reducir la fricción de la superficie, 4) incrementar la conductividad eléctrica, 5) aumentar la resistencia eléctrica, 6) preparar una superficie metálica para un procesamiento posterior y 7) reconstruir las superficies gastadas o erosionadas durante el servicio.

Algunas veces los materiales no metálicos también se recubren. Ejemplos comunes son: 1) piezas plásticas recubiertas para darles un aspecto metálico; 2) recubrimientos antirreflejantes aplicados a lentes de cristales ópticos y 3) ciertos procesos de recubrimiento y deposición usados en la fabricación de chips semiconductores (capítulo 35) y tarjetas de circuitos impresos (capítulo 36).

En este capítulo se analizan los procesos más importantes de recubrimiento industrial. La característica común de éstos es que todos producen un recubrimiento independiente sobre la superficie del material de sustrato. Debe obtenerse una buena adhesión entre el recubrimiento y el sustrato, y para que esto ocurra la superficie de éste debe estar muy limpia.

29.1 CHAPEADO Y PROCESOS RELACIONADOS

El chapeado implica el recubrimiento de una delgada capa metálica sobre la superficie de un material del sustrato. Por lo general, el sustrato es metálico, aunque existen métodos para chapear piezas plásticas y cerámicas. La tecnología de chapeado más conocida y de mayor uso es la galvanoplastia.

29.1.1 Galvanoplastia

La ***galvanoplastia***, también conocida como ***electrochapeado*** o ***chapeado electroquímico***, es un proceso electrolítico (sección 4.5.) en el cual se depositan iones metálicos en una solución electrolítica sobre una pieza de trabajo que funciona como cátodo. La disposición se muestra en la figura 29.1. Por lo general, el ánodo está hecho del metal que se recubre y, por lo tanto, funciona como fuente del metal chapeado. Se pasa corriente directa de un transformador externo entre el ánodo y el cátodo. El electrólito es una solución acuosa de ácidos, bases o sales que conduce corriente eléctrica mediante el movimiento de iones metálicos del chapeado en solución. Para óptimos resultados, las piezas deben pasar por una limpieza química justo antes de la galvanoplastia.

Principios de la galvanoplastia El chapeado electroquímico se basa en dos leyes físicas de Faraday. En resumen y para los propósitos de este texto, las leyes establecen que: 1) la masa de una sustancia liberada en electrólisis es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por la celda; y 2) la masa del material liberado es proporcional a su equivalente electroquímico (la relación de peso atómico sobre valencia). Los efectos pueden resumirse en la ecuación:

$$V = CIt \tag{29.1}$$

donde V = volumen de metal chapeado, en mm^3 (in^3); C = constante de chapeado, que depende del equivalente electroquímico y la densidad, mm^3/amp-s (in^3/amp-min); I = corriente, amps; y t = tiempo durante el que se aplica la corriente, s (min). El producto It (corriente $\times$ tiempo) es la carga eléctrica que pasa por la celda y el valor de C indica la cantidad de material chapeado que se deposita en la pieza de trabajo catódica por carga eléctrica.

Para la mayoría de los metales chapeados, no toda la energía eléctrica del proceso se usa para deposición; alguna parte de energía se consume en otras reacciones, como la liberación de hidrógeno en el cátodo. Esto reduce la cantidad de metal chapeado. La cantidad real de metal depositado en el cátodo (pieza de trabajo) dividida entre la cantidad teórica

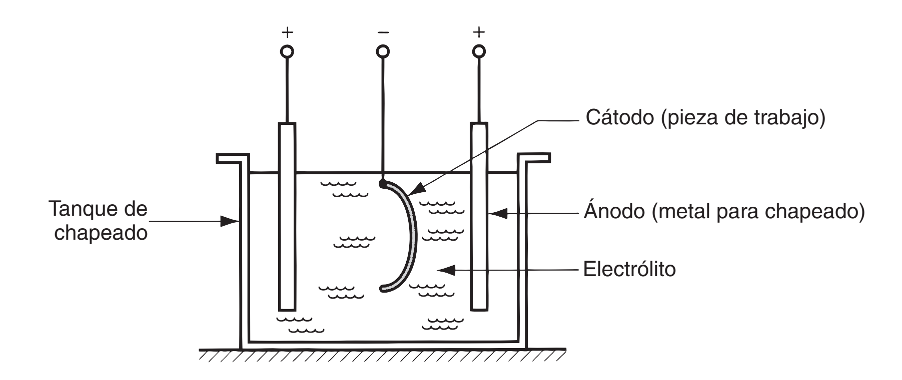


FIGURA 29.1 Disposición para la galvanoplastia.

TABLA 29.1 Eficiencias típicas del cátodo en la galvanoplastia y valores de la constante de chapeado *C*.

Metal chapeado[a]	Electrólito	Eficiencia del cátodo, %	Constante de chapeado C[a] mm³/amp-s	in³/amp-min
Cadmio (2)	Cianuro	90	6.73×10^{-2}	2.47×10^{-4}
Cromo (3)	Cromo-ácido-sulfato	15	2.50×10^{-2}	0.92×10^{-4}
Cobre (1)	Cianuro	98	7.35×10^{-2}	2.69×10^{-4}
Oro (1)	Cianuro	80	10.6×10^{-2}	3.87×10^{-4}
Níquel (2)	Sulfato ácido	95	3.42×10^{-2}	1.25×10^{-4}
Plata (1)	Cianuro	100	10.7×10^{-2}	3.90×10^{-4}
Estaño (4)	Sulfato ácido	90	4.21×10^{-2}	1.54×10^{-4}
Zinc (2)	Cloruro	95	4.75×10^{-2}	1.74×10^{-4}

Recopilado de [13].
[a]La valencia más común se proporciona entre paréntesis (); éste es el valor supuesto para determinar la constante de chapeado *C*. Para una valencia diferente, se calcula la nueva *C* multiplicando el valor de *C* en la tabla por la valencia más común y después dividiendo entre la valencia nueva.

dada por la ecuación (29.1), se denomina ***eficiencia del cátodo***. Considerando ésta, una ecuación más precisa para determinar el volumen de metal chapeado es:

$$V = ECIt \tag{29.2}$$

donde E = eficiencia de cátodo y los otros términos se definen igual que antes. Los valores típicos de la eficiencia de cátodo E y la constante de chapeado C para diferentes metales se presentan en la tabla 29.1. El espesor de chapeado promedio puede determinarse a partir de lo siguiente:

$$d = \frac{V}{A} \tag{29.3}$$

donde d = espesor de chapeado, mm (in); V = volumen de metal chapeado a partir de la ecuación (29.2); y A = área superficial de la pieza chapeada, mm² (in²).

EJEMPLO 29.1 Galvanoplastia

Se va a recubrir con níquel una pieza de acero cuya área superficial A = 125 cm². ¿Qué espesor de chapeado promedio resultará si se aplican 12 amps durante 15 minutos en un baño electrolítico con sulfato ácido?

Solución: De la tabla 29.1, la eficiencia de cátodo para el níquel es $E = 0.95$ y la constante de chapeado $C = 3.42(10^{-2})$ mm³/amp-s. Usando la ecuación (29.2), la cantidad total de metal chapeado que se deposita en la superficie de la pieza en 15 minutos está dada por

$$V = 0.95(3.42 \times 10^{-2})(12)(15)(60) = 350.9 \text{ mm}^3$$

Esto se extiende a través de un área A = 125 cm² = 12 500 mm², por lo que el espesor del chapeado promedio es:

$$d = \frac{350.9}{12\,500} = \mathbf{0.028\ mm}$$

Métodos y aplicaciones Existe una variedad de equipos para la galvanoplastia, su elección depende del tamaño y la geometría de las piezas, los requisitos de resultados y el metal para chapeado. Los métodos principales son: 1) chapeado en tambor, 2) chapeado en estantes y 3) chapeado en tiras. El ***chapeado en tambor*** se realiza en tambores giratorios orientados en forma horizontal o en un ángulo oblicuo (35°). El método es conveniente para el chapeado de muchas piezas pequeñas en un lote. El contacto eléctrico se mantiene a través de la acción de frotado de las piezas entre sí y mediante un conductor conectado externamente que se proyecta dentro del tambor. Existen limitaciones para el chapeado en tambor; la acción de frotado inherente al proceso puede dañar las piezas de metal suave, los componentes roscados, las piezas que requieren buenos acabados y las piezas pesadas con bordes afilados.

El ***chapeado en estantes*** se usa para piezas que son demasiado grandes, pesadas o complejas para el chapeado en tambor. Los estantes están hechos de alambre de cobre de

calibre grueso con las formas adecuadas para sostener las piezas y conducir la corriente a través de ellas. Los estantes están fabricados de modo que las piezas de trabajo puedan colgarse en ganchos, sostenerse con sujetadores o cargarse en canastas. Para evitar el chapeado del cobre mismo, los estantes se cubren con aislante, excepto en las partes donde existe contacto. El ***chapeado en tiras*** es un método de alta producción en el que el trabajo consiste en una tira continua que se jala a través de la solución de chapeado mediante un riel de alimentación. El alambre chapeado es un ejemplo de una aplicación adecuada. Con este método también pueden chapearse piezas pequeñas de láminas metálicas unidas en una larga tira. El proceso puede prepararse de modo que sólo se involucren las regiones específicas de las piezas, por ejemplo, los puntos de contacto chapeados con oro en los conectores eléctricos.

Los metales para recubrimiento más comunes en la galvanoplastia incluyen el zinc, el níquel, el estaño, el cobre y el cromo. El acero es el metal de sustrato más común. En la joyería, también se chapean metales preciosos (oro, plata y platino). El oro también se usa para contactos eléctricos.

Los productos de acero ***chapeados con zinc*** incluyen sujetadores, artículos de alambres, cajas para interruptores eléctricos y diferentes piezas de lámina metálica. El recubrimiento con zinc sirve como una barrera que se sacrifica para evitar la corrosión del metal subyacente. Un proceso alternativo para recubrir acero con zinc es el galvanizado (sección 29.1.4). El ***chapeado con níquel*** se usa para resistir la corrosión y con propósitos decorativos sobre el acero, el latón, las fundiciones de troqueles de zinc y otros metales. Las aplicaciones incluyen el acabado interior automotriz y otros bienes de consumo. El níquel también se usa como una cubierta de base bajo una chapa de cromo mucho más delgada. El ***chapeado con estaño*** se usa ampliamente para proteger contra la corrosión "latas de estaño" y otros contenedores de alimento. También se usa para mejorar la soldabilidad de conectores eléctricos.

El ***cobre*** tiene varias aplicaciones importantes como metal de chapeado. Se usa ampliamente como recubrimiento decorativo en acero y zinc, ya sea solo o en aleaciones con zinc, como el chapeado de latón. También tiene importantes aplicaciones en tarjetas de circuitos impresos (sección 36.2). Por último, el cobre se aplica con frecuencia sobre acero como base, bajo una chapa de níquel y/o cromo. El ***chapeado con cromo*** (conocido como ***cromado***) se valora por su aspecto decorativo y se usa ampliamente en aplicaciones automotrices, de muebles para oficina y de utensilios para cocina. También produce una de las galvanoplastias más duras, y por esta razón se usa para piezas que requieren resistencia al desgaste (por ejemplo, pistones hidráulicos y cilindros, anillos de pistones, componentes de motores de aeronaves y guías roscadas en maquinaria textil).

29.1.2 Electroformado

Este proceso es virtualmente igual a la galvanoplastia, pero su propósito es muy distinto. El ***electroformado*** implica la deposición electrolítica de metal en un patrón hasta obtener el espesor requerido; después se remueve el patrón para dejar la pieza formada. Mientras que el espesor de un chapeado común es sólo de aproximadamente 0.05 mm (0.002 in) o menos, con frecuencia las piezas electroformadas son mucho más gruesas, por lo que el ciclo de producción es proporcionalmente más largo.

Los patrones usados en el electroformado son sólidos o desechables. Los sólidos tienen un ahusamiento u otra geometría que permite la remoción de la pieza electrochapeada. Los desechables se destruyen durante la remoción de la pieza; se usan cuando la forma de la pieza imposibilita un patrón sólido. Los modelos desechables son fusibles o solubles. Los de tipo fusible están hechos de aleaciones de baja fusión, plásticos, cera u otro material que puede removerse por fusión. Cuando se usan materiales no conductores, el patrón o modelo debe metalizarse para aceptar el recubrimiento electrodepositado. Los de tipo soluble están hechos de un material que puede disolverse con facilidad mediante productos químicos; por ejemplo, el aluminio se disuelve en hidróxido de sodio (NaOH).

Por lo general, las piezas electroformadas se fabrican con cobre, níquel y aleaciones de níquel-cobalto. Las aplicaciones incluyen moldes finos para lentes, discos compactos (CD) y de video(DVD) y placas para estampar e imprimir. Una aplicación con mucha demanda es

la producción de moldes para discos compactos y de video, ya que los detalles de la superficie que deben imprimirse en el disco se miden en μm (1 μm = 10^{-6} m). Estos detalles se obtienen con facilidad en el molde mediante electroformado.

29.1.3 Chapeado sin electricidad

El ***chapeado sin electricidad*** es el nombre que se da al proceso de recubrimiento que se produce completamente mediante reacciones químicas, no se requiere una fuente externa de corriente eléctrica. La deposición del metal sobre la superficie de una pieza ocurre en una solución acuosa que contiene los iones del metal para chapeado que se vaya a utilizar. El proceso utiliza un agente reductor y la superficie de la pieza de trabajo actúa como catalizador para la reacción.

Los metales que pueden emplearse para el chapeado sin electricidad son pocos; y para los que pueden procesarse mediante esta técnica, el costo es generalmente mayor que en el chapeado electroquímico. El metal para chapeado sin electricidad más común es el níquel y algunas de sus aleaciones (Ni-Co, Ni-P y Ni-B). También se usa el cobre y, en menor grado, el oro como metales para chapeado. El chapeado con níquel se usa para aplicaciones que requieren de una alta resistencia a la corrosión y al desgaste. El chapeado con cobre sin electricidad se usa para recubrir a través de orificios de tableros de circuitos impresos (sección 36.2.4). El Cu también puede utilizarse sobre piezas plásticas con propósitos decorativos. Las ventajas que algunas veces se citan para el chapeado sin electricidad incluyen: 1) espesores de chapeado uniformes sobre geometrías de piezas complejas (lo cual es un problema con la galvanoplastia), 2) el proceso puede usarse en sustratos metálicos y no metálicos y 3) no se necesita un suministro de corriente directa para llevar a cabo el proceso.

29.1.4 Inmersión en caliente

La ***inmersión en caliente*** es un proceso en el que un sustrato metálico se sumerge en un baño fundido de un segundo metal; después de la remoción, el segundo metal recubre al primero. Por supuesto, el primer metal debe poseer una temperatura de fusión más alta que el segundo. Los metales de sustrato más comunes son el acero y el hierro. El zinc, el aluminio, el estaño y el plomo son los metales de recubrimiento más comunes. La inmersión en caliente funciona para formar capas de transición sobre compuestos de aleación variable. Por lo general, junto al sustrato se encuentran compuestos intermetálicos de los dos metales; en el exterior hay aleaciones de solución sólida que consisten, sobre todo, en metal de recubrimiento. Las capas de transición proporcionan una excelente adhesión del recubrimiento.

El propósito principal de la inmersión en caliente es la protección contra la corrosión. Normalmente operan dos mecanismos para proporcionar esta protección: 1) protección de barrera, el recubrimiento funciona como un escudo para el metal que está debajo; y 2) protección de sacrificio, el recubrimiento se corroe mediante un proceso electroquímico lento para preservar el sustrato.

La inmersión en caliente recibe diferentes nombres, dependiendo del metal de recubrimiento: ***galvanizado*** es cuando el zinc (Zn) recubre acero o hierro; el ***aluminizado*** se refiere al recubrimiento de aluminio (Al) sobre un sustrato; en el ***estañado***, el recubrimiento es estaño (Sn); y la ***chapa de plomo-estaño*** describe el recubrimiento con una aleación de plomo y estaño sobre acero. El galvanizado es, por mucho, el más importante de los procesos por inmersión en caliente, con una antigüedad de alrededor de 200 años. Se aplica para acabar piezas de acero y hierro en un proceso por lotes, así como a láminas, tiras, tuberías, conductos y alambres en un proceso automatizado continuo. En forma típica, el espesor del recubrimiento varía de 0.04 a 0.09 mm (0.0016 a 0.0035 in). El espesor de capa se controla principalmente mediante el tiempo de inmersión. La temperatura del baño se mantiene alrededor de 450 °C (850 °F).

El uso comercial del aluminizado va en aumento y gradualmente comparte más el mercado con el galvanizado. Los recubrimientos por inmersión en aluminio caliente proporcionan una excelente protección contra la corrosión, en algunos casos cinco veces más eficaz que el galvanizado [13]. El chapeado con estaño mediante inmersión en caliente

proporciona una protección contra la corrosión no tóxica para el acero, en aplicaciones para envases de alimentos, equipos para lácteos y aplicaciones de soldadura suave. La inmersión en caliente ha sido gradualmente rebasada por la galvanoplastia como el método comercial preferido para el recubrimiento de estaño sobre acero. El chapeado con plomo-estaño involucra la inmersión en caliente de una aleación de plomo-estaño sobre acero. La aleación es predominantemente de plomo (sólo de 2 a 15% es Sn); sin embargo, se requiere estaño para obtener la adhesión satisfactoria del recubrimiento. El chapeado con plomo y estaño es el método de recubrimiento de menor costo para el acero, pero su protección contra la corrosión es limitada.

29.2 RECUBRIMIENTOS POR CONVERSIÓN

El ***recubrimiento por conversión*** se refiere a una familia de procesos en los cuales se forma una película delgada de óxido, fosfato o cromato sobre una superficie metálica mediante reacción química o electroquímica. La inmersión y la aspersión son los dos métodos comunes para exponer la superficie metálica a los productos químicos reactivos. Los metales comunes tratados mediante recubrimiento por conversión son el acero (incluido el acero galvanizado), el zinc y el aluminio. Sin embargo, casi cualquier producto de metal puede resultar beneficiado por este tratamiento. Las razones importantes para usar los procesos de recubrimiento por conversión son: 1) protección contra la corrosión, 2) preparación para pintura, 3) reducción del desgaste, 4) permitir que la superficie contenga mejores lubricantes para procesos de formado metálico, 5) aumentar la resistencia eléctrica de la superficie, 6) acabado decorativo y 7) identificación de piezas [13].

Los procesos de recubrimiento por conversión se dividen en dos categorías: 1) tratamientos químicos y 2) anodizado. La primera categoría incluye procesos que implican sólo una reacción química; los recubrimientos por conversión con fosfato y cromato son los tratamientos comunes. La segunda categoría es el ***anodizado***, en la cual se produce un recubrimiento de óxido mediante una reacción electroquímica (anodizado es una contracción de ***oxidación anódica***). La mayoría de las veces este proceso de recubrimiento se asocia con el aluminio y sus aleaciones.

29.2.1 Recubrimientos por conversión química

Estos procesos operan al exponer el metal base a ciertos productos químicos que forman películas superficiales delgadas y no metálicas. En la naturaleza ocurren reacciones similares; algunos ejemplos son la oxidación del hierro y del aluminio. Mientras que la herrumbre destruye progresivamente el hierro, la formación de un recubrimiento delgado de Al_2O_3 sobre el aluminio protege el metal base. El propósito de estos tratamientos de conversión química es conseguir este último efecto. Los dos procesos principales son recubrimientos con fosfatos y cromatos.

El ***recubrimiento con fosfato*** transforma la superficie del metal base en una película protectora de fosfato mediante la exposición a soluciones de ciertas sales de fosfatos (por ejemplo, Zn, Mg y Ca) junto con ácido fosfórico diluido (H_3PO_4). El espesor del recubrimiento varía de 0.0025 a 0.05 mm (0.0001 a 0.002 in). Los metales base más comunes son el zinc y el acero, incluido el acero galvanizado. El recubrimiento con fosfato funciona como una preparación útil para la pintura en las industrias automotriz y de aparatos eléctricos pesados.

El ***recubrimiento con cromato*** convierte el metal base en diversas formas de películas de cromatos, mediante soluciones acuosas de ácido crómico, sales de cromatos y otros productos químicos. Los metales tratados con este método incluyen el aluminio, el cadmio, el cobre, el magnesio y el zinc (y sus aleaciones). El método común de aplicación es la inmersión de la pieza base. Los recubrimientos por conversión con cromatos son de alguna forma más delgados que con fosfatos, por lo general menores de 0.0025 mm (0.0001 in). Las razones usuales para un recubrimiento con cromatos son: 1) protección contra la corrosión, 2) base para pintura y 3) propósitos decorativos. Los recubrimientos con cromatos pueden ser transparentes o de colores; los colores disponibles incluyen el verde olivo, el bronce, el amarillo o el azul brillante.

29.2.2 Anodizado

Mientras que los procesos anteriores se ejecutan normalmente sin electrólisis, el ***anodizado*** es un tratamiento electrolítico que produce una capa de óxido estable sobre una superficie metálica. Sus aplicaciones más comunes son con aluminio y magnesio, pero también se aplica en zinc, titanio y otros metales menos comunes. Los recubrimientos por anodizado se usan principalmente para propósitos decorativos; también proporcionan protección contra la corrosión.

Resulta interesante comparar el anodizado con la galvanoplastia, porque ambos son procesos electrolíticos. Pueden resaltarse dos diferencias: 1) en el chapeado electroquímico, la pieza de trabajo que va a recubrirse es el cátodo en la reacción. Por otro lado, en el anodizado el trabajo es el ánodo, mientras que el tanque de procesamiento es catódico. 2) En la galvanoplastia, el recubrimiento se aumenta mediante la adhesión de iones de un segundo metal a la superficie metálica base. En el anodizado, el recubrimiento de la superficie se forma mediante una reacción química del metal de sustrato dentro de una capa de óxido.

En los recubrimientos por anodizado el espesor varía generalmente entre 0.0025 y 0.075 mm (0.0001 y 0.003 in). Se puede incorporar tintes en el proceso de anodizado para crear una amplia variedad de colores; esto es muy común en el anodizado con aluminio. También se puede lograr recubrimientos muy gruesos sobre aluminio, hasta de 0.25 mm (0.010 in), mediante un proceso especial llamado ***anodizado duro***; estos recubrimientos son notables por su alta resistencia al desgaste y a la corrosión.

29.3 DEPOSICIÓN FÍSICA DE VAPOR

La ***deposición física de vapor*** (PVD, por sus siglas en inglés) es un grupo de procesos en los cuales se convierte un material en su fase de vapor en una cámara de vacío y se condensa sobre una superficie de sustrato como una película muy delgada. La PVD se usa para aplicar una amplia variedad de materiales de recubrimiento: metales, aleaciones, cerámicas y otros compuestos inorgánicos e incluso ciertos polímeros. Los sustratos posibles incluyen metales, vidrio y plástico. Por lo tanto, representa una tecnología de recubrimiento muy versátil, aplicable a una combinación casi ilimitada de sustancias de recubrimiento y materiales de sustratos.

Las aplicaciones de la PVD incluyen los recubrimientos decorativos delgados sobre piezas de plástico y metálicas, como trofeos, juguetes, plumas y lápices, empaques para relojes y acabados interiores de automóviles. Los recubrimientos son películas delgadas de aluminio (alrededor de 150 nm) cubiertas con laca transparente para proporcionar un aspecto de plata o cromo. Otro uso es la aplicación de recubrimientos antirreflejantes de fluoruro de magnesio (MgF_2) sobre lentes ópticos. La PVD se aplica en la fabricación de artículos electrónicos, principalmente para la deposición de metales que tiene el propósito de formar conexiones eléctricas en circuitos integrados (capítulo 35). Por último, la PVD utiliza para recubrir nitruro de titanio (TiN) sobre herramientas de corte y moldes de inyección de plásticos para que resistan el desgaste.

Todos los procesos de deposición física de vapor consisten en los siguientes pasos: 1) síntesis del vapor de recubrimiento, 2) transporte del vapor al sustrato y 3) condensación de los vapores sobre la superficie del sustrato. Por lo general, estos pasos se realizan dentro de una cámara de vacío; por ello debe evacuarse la cámara antes del proceso real de PVD.

La síntesis del vapor de recubrimiento puede obtenerse mediante diversos métodos, como el calentamiento por resistencia eléctrica o el bombardeo con iones para vaporizar un sólido (o líquido) existente. Éstas y otras variaciones producen varios procesos de PVD. Se agrupan en tres tipos principales: 1) evaporación al vacío, 2) bombardeo con partículas y 3) chapeado iónico. En la tabla 29.2 se presenta un resumen de estos procesos.

29.3.1 Evaporación al vacío

Ciertos materiales (sobre todo metales puros) pueden depositarse sobre un sustrato, transformándolos primero de estado sólido a vapor en una cámara de vacío y después permitiéndoles que se condensen en la superficie del sustrato. La disposición del proceso de

TABLA 29.2 Resumen de procesos por deposición física de vapor (PVD).

Proceso de PVD	Características y materiales de recubrimiento
Evaporación al vacío	***Características***: el equipo tiene un costo relativamente bajo y es sencillo: la deposición de compuestos es difícil; la adhesión del recubrimiento no es tan buena como para otros procesos de PVD. ***Materiales típicos de recubrimiento***: Ag, Al, Au, Cr, Cu, Mo, W.
Bombardeo con partículas	***Características***: mejor descarga de energía y adhesión del recubrimiento que la evaporación al vacío; pueden recubrirse compuestos, velocidades de deposición más lentas y un control del proceso más difícil que la evaporación al vacío. ***Materiales típicos de recubrimiento***: Al_2O_3, Au, Cr, Mo, SiO_2, Si_3N_4, TiC, TiN.
Chapeado iónico	***Características***: mejor cobertura y adhesión del recubrimiento entre los procesos de PVD, control de proceso más complejo, velocidades de deposición más altas que el bombardeo con partículas. ***Materiales típicos de recubrimiento***: Ag, Au, Cr, Mo, Si_3N_4, TiC, TiN.

Recopilado de [1].

evaporación al vacío se muestra en la figura 29.2. El material que va a depositarse, llamado la fuente, se calienta a una temperatura suficientemente alta para evaporarse (o sublimarse). Dado que el calentamiento se obtiene al vacío, la temperatura requerida para la evaporización es significativamente menor que la temperatura correspondiente requerida a presión atmosférica normal. Asimismo, la ausencia de aire en la cámara evita la oxidación del material fuente a las temperaturas de calentamiento.

Pueden usarse varios métodos para calentar y vaporizar el material. Debe incluirse un recipiente para contener el material de recubrimiento (el material fuente) antes de la vaporización. Entre los métodos de vaporización más importantes están el calentamiento por resistencia y el bombardeo con haz de electrones. El ***calentamiento por resistencia*** es la tecnología más sencilla. Se forma un metal refractario (por ejemplo, W o Mo) en un recipiente adecuado para contener al material fuente. Se aplica una corriente para calentar el envase; éste transmite calor al material en contacto. Un problema con el método de calentamiento es la aleación posible entre el recipiente y su contenido, de modo que la película depositada se contamina con el metal del recipiente de calentamiento por resistencia. En el ***bombardeo con haz de electrones***, se dirige una corriente de electrones a alta velocidad para bombardear la superficie del material fuente a fin de provocar la vaporización. En contraste con el calentamiento por resistencia, actúa muy poca energía para calentar el recipiente, por lo que se minimiza la contaminación del material del envase con el recubrimiento.

Cualquiera que sea la técnica de evaporación, los átomos evaporados dejan la fuente y siguen trayectorias en línea recta hasta que chocan con otras moléculas de gas o con una superficie sólida. El vacío dentro de la cámara prácticamente elimina otras moléculas de gas, por lo que reduce la probabilidad de choques con átomos del vapor de la fuente. Por lo general, la superficie del sustrato que se va cubrir se coloca en relación con la fuente, de modo que se asegure la deposición de los átomos en forma de vapor sobre la superficie

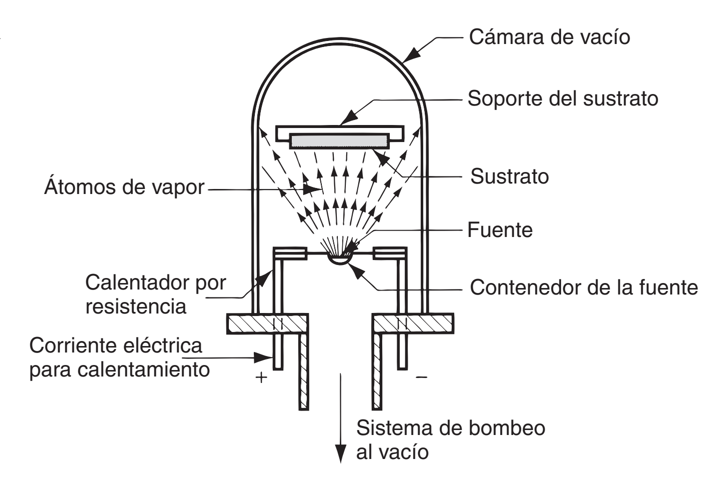


FIGURA 29.2 Arreglo para la PVD por evaporación al vacío.

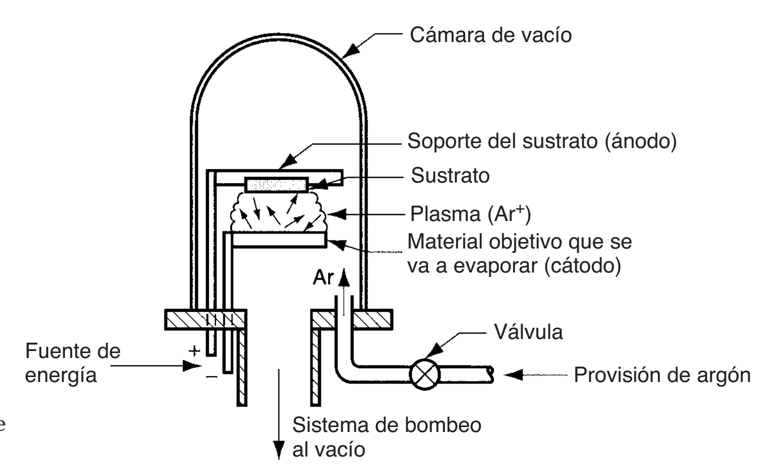


FIGURA 29.3 Un arreglo posible para el bombardeo con partículas, una forma de deposición física de vapor.

sólida. A veces se usa un manipulador mecánico para rotar el sustrato de tal manera que se recubran todas las superficies. Después del contacto con la superficie del sustrato relativamente fría, el nivel de energía de los átomos que chocan se reduce de manera repentina, hasta un punto donde ya no pueden permanecer en estado de vapor; se condensan y se pegan a la superficie sólida, formando una película delgada depositada.

29.3.2 Bombardeo con partículas

Si la superficie de un sólido (o líquido) se bombardea mediante partículas atómicas de energía suficientemente alta, los átomos individuales de la superficie pueden adquirir suficiente energía debido a la colisión, de modo que se proyecten de la superficie mediante transferencia de cantidad de movimiento. Éste es el proceso conocido como bombardeo con partículas. La forma más conveniente de emplear partículas de alta energía es con un gas ionizado, como el argón, energizado mediante un campo eléctrico para formar un plasma. Como un proceso de PVD, el ***bombardeo con partículas*** involucra el bombardeo de material de recubrimiento catódico con los iones de argón, (Ar^+), lo que provoca que los átomos de la superficie escapen y se depositen en un sustrato, formando una película delgada sobre la superficie. El sustrato debe colocarse cerca del cátodo y, por lo general, se calienta para mejorar la unión de los átomos del recubrimiento. En la figura 29.3 se muestra un arreglo típico.

Mientras que la evaporación al vacío generalmente se limita a metales, el bombardeo con partículas puede aplicarse casi a cualquier material, elementos metálicos y no metálicos; aleaciones, cerámicas y polímeros. Las películas de aleaciones y compuestos pueden bombardearse con partículas sin cambiar sus composiciones químicas. Las películas de compuestos químicos también pueden depositarse empleando gases reactivos que forman óxidos, carburos o nitruros con el metal bombardeado.

Las desventajas de la PVD por bombardeo con partículas incluyen: 1) velocidades de deposición lentas y 2) como los iones que bombardean la superficie son un gas, por lo general se encuentran restos del gas en las películas de recubrimiento y, en ocasiones, los gases atrapados afectan de manera adversa las propiedades mecánicas.

29.3.3 Chapeado iónico

El chapeado iónico usa una combinación de bombardeo con partículas y evaporación al vacío para depositar una película delgada sobre un sustrato. El proceso funciona de la siguiente manera: el sustrato se prepara para que funcione como cátodo en la pieza superior de la cámara y el material fuente se coloca debajo. Después se establece un vacío en la cámara. Se inyecta gas argón y se aplica un campo eléctrico para ionizar el gas (Ar^+) y establecer un plasma. Esto produce un bombardeo iónico del sustrato, por lo que su superficie se frota hasta una condición de limpieza atómica (esto se interpreta como "muy

limpia"). Enseguida, el material fuente se calienta lo suficiente para generar vapores de recubrimiento. Los métodos de calentamiento usados aquí son similares a los que se emplean en la evaporación al vacío: calentamiento por resistencia, bombardeo con haz de electrones, etcétera. Las moléculas de vapor pasan a través del plasma y recubren el sustrato. El bombardeo con partículas continúa durante el proceso, por lo que el bombardeo con iones consiste no sólo en los iones de argón originales, sino también con iones del material fuente que se han energizado mientras han estado sujetos al mismo campo de energía que el argón. El efecto de estas condiciones de procesamiento es producir películas de espesor uniforme y una excelente adherencia al sustrato.

El chapeado iónico es aplicable a piezas que tienen geometrías irregulares debido a los efectos de dispersión que existen en el campo del plasma. Un ejemplo interesante es el recubrimiento con TiN de herramientas de acero para corte de alta velocidad (por ejemplo, brocas de taladro). Además de la uniformidad en el recubrimiento y una buena adherencia, otras ventajas del proceso son altas velocidades de deposición, altas densidades de la película y la capacidad de recubrir las paredes internas de orificios y otras formas huecas.

29.4 DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR

La PVD implica la deposición de un recubrimiento mediante condensación sobre un sustrato, desde la fase de vapor. Por el contrario, la ***deposición química de vapor*** (CVD, por sus siglas en inglés) implica la interacción entre una mezcla de gases y la superficie de un sustrato calentado, lo que provoca la descomposición química de algunas de las partes del gas y la formación de una película sólida en el sustrato. Las reacciones ocurren en una cámara de reacción sellada. El producto de la reacción (ya sea un metal o un compuesto) forma un núcleo y crece en la superficie del sustrato para formar el recubrimiento. La mayoría de las reacciones de CVD requieren calor. Sin embargo, dependiendo de los productos químicos implicados, las reacciones pueden ser provocadas por otras fuentes de energía, tales como la luz ultravioleta o un plasma. La CVD incluye un amplio rango de presiones y temperaturas, y se aplica a una gran variedad de materiales de recubrimiento y de sustrato.

Los procesos metalúrgicos industriales basados en la deposición química de vapor datan del siglo XIX (por ejemplo, el proceso de Mond en la tabla 29.3). El interés moderno en la CVD se concentra en sus aplicaciones para recubrimiento, tales como las herramientas recubiertas con carburo cementado, las celdas solares, la deposición de metales refractarios en las hojas de turbinas de motores a chorro y otras aplicaciones en donde son importantes la resistencia al desgaste, la corrosión, la erosión y el choque térmico. Además de estas aplicaciones, la deposición química de vapor también es una tecnología importante en la fabricación de circuitos integrados.

Las ventajas que se citan comúnmente para la CVD incluyen: 1) la capacidad de depositar materiales refractarios a temperaturas por debajo de sus puntos de fusión o sinterizado, 2) es posible controlar el tamaño del grano, 3) el proceso se realiza a la presión atmosférica (no requiere equipo de vacío) y 4) hay una buena unión del recubrimiento a la superficie del sustrato [6]. Las desventajas incluyen que: 1) por lo general, la naturaleza corrosiva y/o tóxica de los productos químicos requiere una cámara cerrada así como equipo de bombeo y disposición especial, 2) ciertos ingredientes para la reacción son relativamente costosos y 3) la utilización de material es baja.

Materiales y reacciones en la CVD En general, los metales que se tratan con facilidad con galvanoplastia no son buenos candidatos para la CVD, debido a los productos químicos peligrosos que deben usarse y a los costos de medidas de seguridad para contrarrestar sus riesgos. Los metales convenientes para recubrimiento mediante CVD incluyen el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el vanadio y el tantalio. La deposición química de vapor es especialmente adecuada para la de compuestos, como el óxido de aluminio (Al_2O_3), el dióxido de silicio (SiO_2), el nitruro de silicio (Si_3N_4), el carburo de titanio (TiC) y el nitruro de titanio (TiN). En la figura 29.4 se ilustra la aplicación tanto de la CVD como de la PVD

para proporcionar múltiples recubrimientos resistentes al desgaste sobre una herramienta de corte de carburo cementado.

TABLA 29.3 Algunos ejemplos de reacciones en la deposición química de vapor.

1. El ***proceso de Mond*** incluye un proceso de CVD para descomponer níquel a partir de níquel carbonilo ($Ni(CO)_4$), que es un compuesto intermedio que se forma al reducir el mineral de níquel:

$$Ni(CO)_4 \xrightarrow{200°C\ (400°F)} Ni + 4(CO) \tag{29.4}$$

2. El recubrimiento de carburo de titanio (TiC) sobre un sustrato de carburo de tungsteno cementado (WC-Co) para producir una herramienta de corte con alto rendimiento:

$$TiCl_4 + CH_4 \xrightarrow[\text{excedente de } H_2]{1\,000°C\ (1\,800°F)} TiC + 4CHl \tag{29.5}$$

3. El recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) sobre un sustrato de carburo de tungsteno cementado (WC-Co) para producir una herramienta de corte con alto rendimiento:

$$TiCl_4 + 0.5N2 + 2H_2 \xrightarrow{900°C\ (1\,650°F)} TiN + 4HCl \tag{29.6}$$

4. El recubrimiento de óxido de aluminio (Al_2O_3) sobre un sustrato de carburo de tungsteno cementado (WC-Co) para producir una herramienta de corte con alto rendimiento:

$$2AlCl_3 + 3CO_2 + 3H_2 \xrightarrow{500°C\ (900°F)} Al_2O_3 + 3CO + 6HCl \tag{29.7}$$

5. El recubrimiento de nitruro de silicio (Si_3N_4) sobre silicio (Si), un proceso en la manufactura de semiconductores:

$$3SiF_4 + 4NH_3 \xrightarrow{500°C\ (900°F)} Si_3N_4 + 12HF \tag{29.8}$$

6. El recubrimiento de dióxido de silicio (SiO_2) sobre silicio (Si), un proceso en la fabricación de semiconductores:

$$2SiCl_3 + 3H_2O + 0.5O_2 \xrightarrow{900°C\ (1\,600°F)} 2SiO_2 + 6HCl \tag{29.9}$$

7. El recubrimiento del metal refractario tungsteno (W) sobre un sustrato, tal como en el álabe de una turbina de un motor a chorro:

$$WF_6 + 3H_2 \xrightarrow{600°C\ (1\,100°F)} W + 6HF \tag{29.10}$$

Recopilado de [4], [11] y [13].

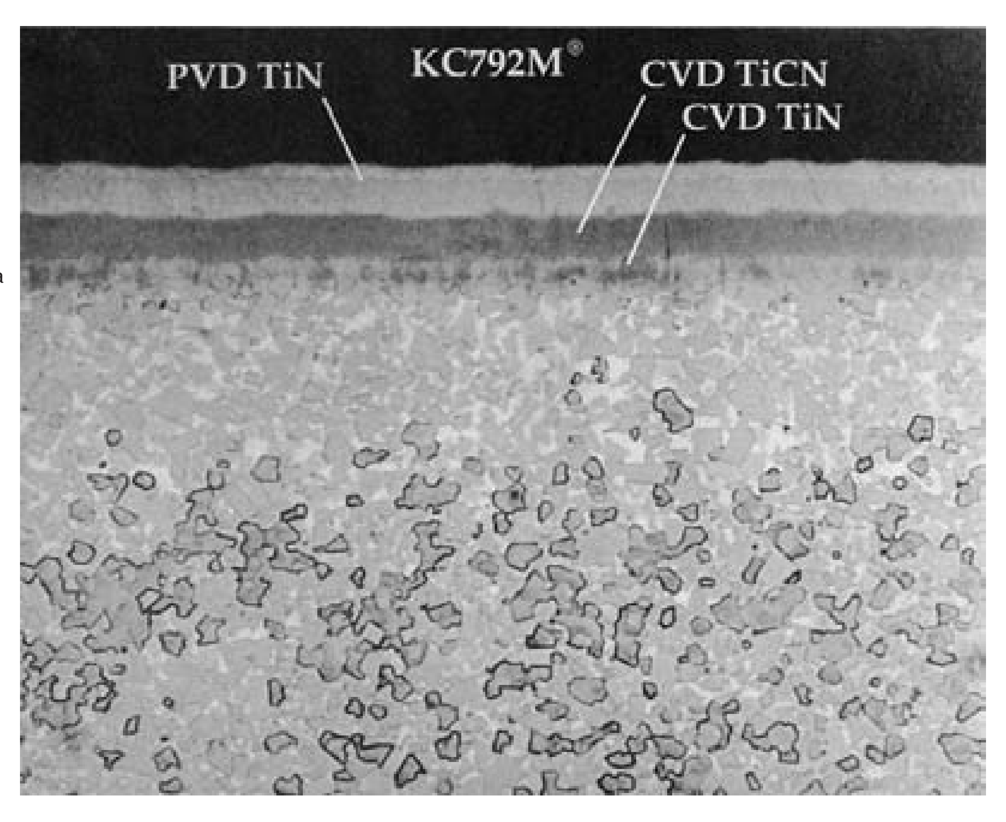


FIGURA 29.4 Fotomicrografía de la sección transversal de una herramienta de corte recubierta con carburo (Kennametal Grade KC792M); se usó CVD para recubrir con TiN y TiCN sobre la superficie de un sustrato de WC-Co, seguida por un recubrimiento de TiN aplicado mediante PVD. (Fotografía cortesía de Kennametal, Inc.).

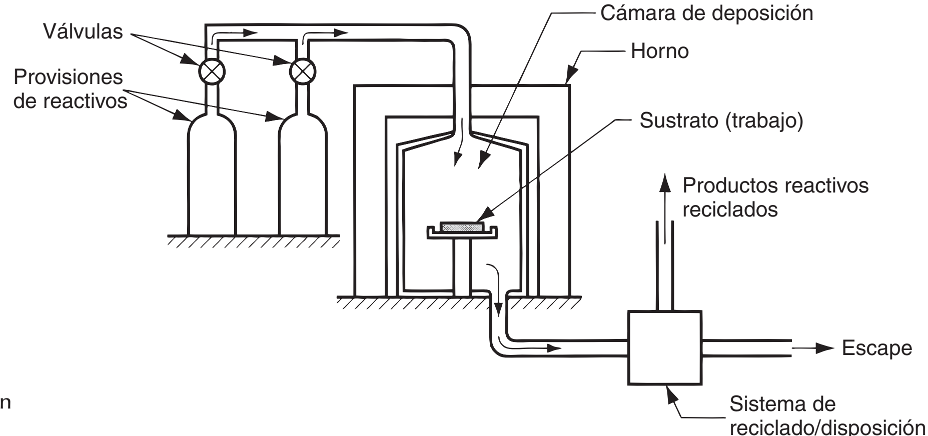


FIGURA 29.5 Un reactor típico usado en la deposición química de vapor.

Los gases o vapores reactivos que se utilizan normalmente son hidruros metálicos (MH_x), cloruros (MCl_x), fluoruros (MF_x) y carbonilos ($M(CO)_x$), donde M = el metal que se va a depositar y x se usa para balancear las valencias en el compuesto. En algunas de las reacciones se usan otros gases, como el hidrógeno (H_2), el nitrógeno (N_2), el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2) y el amoniaco (NH_3). En la tabla 29.3 se presentan algunos ejemplos de reacciones de deposición química de vapor que producen la deposición de un metal o recubrimiento cerámico sobre un sustrato conveniente. También se dan las temperaturas típicas a las que se realizan estas reacciones.

Equipo de procesamiento Los procesos de deposición química de vapor se realizan en un reactor, que consiste en: 1) sistema de suministro de reactivos, 2) cámara de deposición y 3) sistema de reciclado/disposición. Aunque las configuraciones de reactores difieren dependiendo de la aplicación, en la figura 29.5 se presenta un diseño posible de reactor para CVD. El sistema de suministro de reactivos incorpora éstos para la cámara de deposición en las proporciones adecuadas. Se requieren distintos tipos de sistemas de provisión, dependiendo de si los reactivos se incorporan como gas, líquido o sólido (por ejemplo, granos o polvos).

La cámara de deposición contiene los sustratos y las reacciones químicas que conducen a la deposición de los productos de reacción sobre las superficies del sustrato. La deposición ocurre a temperaturas elevadas y el sustrato debe calentarse por inducción, por calor radiante u otros medios. Las temperaturas de deposición para diferentes reacciones de CVD oscilan entre 250 y 1950 °C (500 y 3500 °F), de manera que la cámara debe diseñarse para cumplir con estas demandas de temperatura.

El tercer componente del reactor es el sistema de reciclado/disposición, cuya función es volver inofensivos los subproductos de la reacción de CVD. Esto incluye la recolección de materiales tóxicos, corrosivos e inflamables, seguida por una disposición y procesamiento adecuados.

Formas alternativas de CVD Lo que se ha descrito hasta ahora es la ***deposición química de vapor a presión atmosférica*** (APCVD, por sus siglas en inglés), en la cual las reacciones se realizan a una presión o casi a una presión atmosférica. Para muchas reacciones, hay ventajas al realizar el proceso a presiones inferiores a la atmosférica. Esto se denomina ***deposición química de vapor a baja presión*** (LPCVD, por sus siglas en inglés), donde las reacciones ocurren en un vacío parcial. Las ventajas citadas para la LPCVD incluyen: 1) espesor uniforme, 2) buen control sobre la composición y la estructura, 3) baja temperatura de procesamiento, 4) altas velocidades de deposición, 5) rendimientos altos y bajos costos de procesamiento [11]. El problema técnico en la LPCVD es el diseño de bombas de vacío para crear el vacío parcial cuando los productos de la reacción no sólo estén calientes sino también sean corrosivos. Con frecuencia estas bombas deben incluir sistemas para enfriar y atrapar los gases corrosivos antes de que lleguen a la unidad de bombeo real.

Otra variación de la CVD es la ***deposición química de vapor asistida con plasma*** (PACVD, por sus siglas en inglés), donde la deposición sobre un sustrato se consigue mediante la reacción de los ingredientes en un gas que se ha ionizado mediante una descarga eléctrica (es decir, un plasma). En efecto, se usa la energía contenida en el plasma, en lugar de energía térmica para activar las reacciones químicas. Las ventajas de la PACVD incluyen: 1) menores temperaturas del sustrato, 2) mejor energía de cobertura, 3) mejor adhesión y 4) velocidades de deposición más altas [4]. Entre sus aplicaciones están la deposición de nitruro de silicio (Si_3N_4) en el procesamiento de semiconductores, recubrimientos de TiN y TiC para herramientas y recubrimientos de polímeros. El proceso también se conoce como deposición química de vapor mejorada con plasma (PECVD, por sus siglas en inglés), deposición química de vapor con plasma (PCVD) o simplemente deposición con plasma.

29.5 RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS

Son polímeros y resinas producidos en forma natural o sintética, generalmente formulados para ser aplicados como líquidos que se secan o endurecen para formar películas superficiales delgadas sobre los materiales de sustrato. Estos recubrimientos se aprecian por la variedad de colores y texturas posibles, su capacidad de proteger la superficie del sustrato, su bajo costo y la facilidad con que se aplican. En esta sección se consideran las composiciones de los recubrimientos orgánicos y los métodos para aplicarlos. Aunque la mayoría de los recubrimientos orgánicos se aplican en forma líquida, algunos se aplican como polvos; esta alternativa se considera en la sección 29.5.2.

Los recubrimientos orgánicos se formulan de manera que contienen lo siguiente: 1) aglutinantes, los cuales le dan al recubrimiento sus propiedades; 2) tintes o pigmentos, que proporcionan color al recubrimiento; 3) solventes, para disolver los polímeros y resinas y agregar una fluidez conveniente al líquido y 4) aditivos.

Los ***aglutinantes*** en los recubrimientos orgánicos son polímeros y resinas que determinan las propiedades del estado sólido del recubrimiento, tales como la resistencia, propiedades físicas y la adhesión a la superficie del sustrato. El aglutinante contiene los pigmentos y otros ingredientes en el recubrimiento, durante y después de la aplicación a la superficie. Los aglutinantes más comunes en los recubrimientos orgánicos son aceites naturales (usados para producir pinturas basadas en aceite), resinas de poliésteres, poliuretanos, epóxicos, acrílicos y celulósicos.

Los tintes y pigmentos proporcionan color al recubrimiento. Los ***tintes*** son productos químicos solubles que dan color al recubrimiento líquido, pero no ocultan la superficie que se encuentra debajo. Por lo tanto, los recubrimientos con tinte de color son generalmente transparentes o translúcidos. Los ***pigmentos*** son partículas sólidas de tamaño uniforme y microscópico que se dispersan en el líquido de recubrimiento, pero no se disuelven en él. No sólo dan color al recubrimiento, sino también ocultan la superficie que está debajo. Como los pigmentos son materia en forma de partículas, también tienden a fortalecer el recubrimiento.

Los ***solventes*** se usan para disolver el aglutinante y ciertos ingredientes en el recubrimiento líquido. Los solventes comunes usados en recubrimientos orgánicos son hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, ésteres, acetonas y solventes cloratados. Para los distintos aglutinantes se requieren diferentes solventes. Los ***aditivos*** en los recubrimientos orgánicos incluyen a los dispersantes (para facilitar la dispersión sobre la superficie), insecticidas y fungicidas, espesantes, estabilizadores de congelación/deshielo, estabilizadores para calor y luz, agentes coalescentes, plastificantes, desespumantes y catalizadores para promover las cadenas transversales. Estos ingredientes se formulan para obtener una amplia variedad de recubrimientos, tales como pinturas, lacas y barnices.

29.5.1 Métodos de aplicación

El método para aplicar un recubrimiento orgánico a una superficie depende de varios factores, como la composición del líquido de recubrimiento, el espesor requerido, la velocidad de producción y consideraciones de costo, el tamaño de la pieza y los requerimientos

ambientales. Para cualquiera de los métodos de aplicación, resulta muy importante que la superficie se prepare en forma conveniente. Esto incluye la limpieza y el posible tratamiento de la superficie, como un recubrimiento con fosfato. En algunos casos, las superficies metálicas se chapean antes de un recubrimiento orgánico para una máxima protección contra la corrosión.

Con cualquier método de recubrimiento, la ***eficiencia de transferencia*** es una medida crítica. Ésta es la proporción de pintura que se suministra para el proceso y que en realidad se deposita sobre la superficie de trabajo. Algunos métodos producen una eficiencia de transferencia de sólo 30% (lo que significa que 70% de la pintura se desperdicia y no se recupera).

Los métodos disponibles para aplicar recubrimientos orgánicos líquidos incluyen el uso de brochas y rodillos, la aspersión, la inmersión y el recubrimiento con flujo. En algunos casos, se aplican varios recubrimientos sucesivos a la superficie del sustrato para obtener el resultado deseado. Un ejemplo importante es la carrocería de un automóvil; la siguiente es una secuencia típica que se aplica a la carrocería de hojas metálicas de un automóvil que se produce en masa: 1) se aplica un recubrimiento de fosfato por inmersión, 2) se aplica un recubrimiento de sellador por inmersión, 3) se aplica un recubrimiento de pintura de color por aspersión y 4) se aplica un recubrimiento transparente (para alto brillo y mejor protección) mediante aspersión.

Uso de brochas y rodillos Éstos son los dos métodos de aplicación más conocidos y tienen una alta eficiencia de transferencia, cerca de 100%. Los métodos que utilizan brochas y rodillos manuales son convenientes para bajos volúmenes de producción, pero no para producción masiva. Mientras el uso de brocha es bastante versátil, el empleo de rodillos se limita a superficies planas.

Aspersión El recubrimiento por aspersión es un método de producción muy utilizado para aplicar recubrimientos orgánicos. El proceso obliga al líquido de recubrimiento a atomizarse dentro de un vapor fino justo antes de la deposición sobre la superficie de la pieza. Cuando las gotas chocan contra la superficie se extienden y fluyen juntas para formar un recubrimiento uniforme dentro de la región localizada de la aspersión. Si se hace correctamente, el recubrimiento por aspersión proporciona uno uniforme sobre toda la superficie de trabajo.

El recubrimiento por aspersión se realiza manualmente en cabinas para pintura por aspersión o también puede establecerse como un proceso automatizado. La eficiencia de transferencia es relativamente baja (de sólo 30%) por estos métodos. La eficiencia puede mejorarse mediante la ***aspersión electrostática***, en la cual la pieza de trabajo se carga eléctricamente y las gotas atomizadas se cargan en forma electrostática. Esto hace que las superficies de la pieza atraigan las gotas y aumenten las eficiencias de transferencia hasta valores de 90% [13]. La aspersión se usa ampliamente en la industria automotriz para aplicar recubrimientos de pintura externa a las carrocerías de automóviles. También se usa para recubrir aparatos eléctricos y otros productos de consumo.

Recubrimiento por inmersión y por flujo Estos métodos aplican grandes cantidades de recubrimiento líquido a la pieza de trabajo y permiten drenar el exceso para reciclarlo. El método más simple es el ***recubrimiento por inmersión***, en el cual se sumerge la pieza en un tanque abierto con material de recubrimiento líquido; cuando se retira la pieza, el exceso de líquido se drena de regreso al tanque. Una variación es el ***electrorrecubrimiento***, en el cual la pieza se carga eléctricamente y después se sumerge en un baño de pintura que ha recibido una carga opuesta. Esto mejora la adhesión y permite el uso de pinturas basadas en agua (lo cual reduce los riesgos de incendio y contaminación).

En el ***recubrimiento por flujo*** las piezas de trabajo se mueven a través de una cabina cerrada para pintura, donde una serie de boquillas bañan las superficies de la pieza con el líquido de recubrimiento. El exceso de líquido se drena de regreso a un vertedero, lo cual permite que se reutilice.

Secado y curado Una vez aplicado, el recubrimiento orgánico debe convertirse de líquido a sólido. El término ***secado*** se usa para describir este proceso de conversión. Muchos recubrimientos orgánicos se secan mediante la evaporación de sus solventes. Sin embargo, para for-

mar una película duradera en la superficie del sustrato, es necesaria una conversión adicional, llamada ***curado***. Éste implica un cambio químico en la resina orgánica en la cual ocurre una polimerización o formación de cadenas transversales para endurecer el recubrimiento.

El tipo de resina determina la clase de reacción química que ocurre en el curado. Los principales métodos de curado en los recubrimientos orgánicos son [13]: 1) el ***curado a temperatura ambiente***, que implica la evaporación del solvente y la oxidación de la resina (la mayoría de las lacas se curan mediante este método); 2) el ***curado a temperatura elevada*** en el que las temperaturas elevadas aceleran la evaporación del solvente, así como la polimerización y la formación de cadenas transversales de la resina; 3) el ***curado catalítico***, en el que las resinas de arranque requieren agentes reactivos mezclados justo antes de la aplicación para provocar la polimerización y la formación de cadenas transversales (algunos ejemplos son las pinturas epóxicas y de poliuretano) y 4) el ***curado por radiación***, en el que se requieren diversas formas de radiación, como microondas, luz ultravioleta y haz de electrones, para curar la resina.

29.5.2 Recubrimiento pulverizado

Los recubrimientos orgánicos analizados hasta aquí son sistemas líquidos que consisten en resinas solubles (o al menos mezclables) en un solvente conveniente. Los recubrimientos pulverizados son diferentes. Se aplican como partículas sólidas y secas finamente pulverizadas que se funden en la superficie para formar una película líquida uniforme, después de la cual se resolidifican en un recubrimiento seco. Los sistemas de recubrimiento pulverizado han aumentado significativamente su importancia comercial entre los recubrimientos orgánicos desde mediados de la década de 1970.

Los recubrimientos pulverizados se clasifican como termoplásticos o termofijos (termoestables). Los polvos termoplásticos comunes incluyen el cloruro de polivinilo, el naylon, el poliéster, el polietileno y el polipropileno. Por lo general se aplican como recubrimientos relativamente gruesos, en el rango de 0.08 a 0.30 mm (0.003 a 0.012 in). Los polvos para recubrimiento termofijo comunes son epóxicos, poliésteres y acrílicos. Se aplican como resinas no curadas que se polimerizan y forman cadenas transversales cuando se calientan o reaccionan con otros ingredientes. Los espesores de recubrimiento están generalmente en el rango de 0.025 a 0.075 mm (0.001 a 0.003 in).

Existen dos métodos principales para la aplicación de los recubrimientos pulverizados: aspersión y cama fluidizada. En el método por ***aspersión***, se aplica una carga electrostática a cada partícula para atraerla a una superficie de la pieza que forma una tierra eléctrica. Existen diversos diseños de cañones para aspersión a fin de impartir la carga a los polvos; se operan en forma manual o mediante robots industriales. Se usa aire comprimido para impulsar los polvos a la boquilla. Los polvos están secos cuando se dispersan y es posible reciclar cualquier exceso de partículas que no se pega a la superficie (a menos que se mezclen múltiples colores de pintura en la misma cabina para aspersión). Los polvos se aplican a temperatura ambiente sobre la pieza, después ésta se calienta para fundirlos; también pueden aplicarse sobre una pieza que se ha calentado por encima del punto de fusión del polvo, con lo cual se obtiene un recubrimiento más grueso.

La ***cama fluidizada*** es una alternativa de uso menos frecuente que la aspersión electrostática. En este método, la pieza de trabajo a recubrir se calienta con anticipación y se pasa por un lecho fluidizado que contiene polvos suspendidos (fluidizados) mediante una corriente de aire. Estos polvos se adhieren a la superficie de la pieza para formar el recubrimiento. En algunas implantaciones de este método, los polvos se cargan electrostáticamente para aumentar la atracción hacia la superficie de la pieza conectada a tierra.

29.6 ESMALTADO EN PORCELANA Y OTROS RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS

La porcelana es una cerámica hecha de caolín, feldespato y cuarzo (capítulo 7). Puede aplicarse a metales de sustrato, como acero, hierro fundido y aluminio como un esmalte vítreo.

Los recubrimientos porcelanizados son valiosos por su belleza, color, tersura, facilidad de limpieza, inercia química y durabilidad general. El nombre que se asigna a la tecnología que usa estos materiales de recubrimiento cerámico, así como a los procesos mediante los cuales se aplica es ***esmaltado en porcelana***.

Éste se utiliza en una amplia variedad de productos, incluidos accesorios para baños (estufas, tinas, retretes), artículos eléctricos para el hogar (cocinas, calentadores de agua, lavadoras de ropa y de platos), artículos para cocina, utensilios para hospitales, componentes de motores de propulsión a chorro, silenciadores de automóviles y tarjetas de circuitos electrónicos. Las composiciones de las porcelanas varían, dependiendo de los requerimientos del producto. Algunas porcelanas se formulan por color y belleza, mientras que otras se diseñan por funciones como la resistencia a los productos químicos y el clima, la capacidad de resistir altas temperaturas de servicio, la dureza, la resistencia a la abrasión y la resistencia eléctrica.

Como proceso, el esmaltado en porcelana consiste en: 1) preparación del material de recubrimiento**,** 2) aplicación sobre la superficie, 3) secado, si es necesario y 4) cocimiento. La preparación implica convertir la porcelana vítrea en partículas finas, llamadas ***frita*** que se trituran a un tamaño adecuado y consistente. Los métodos para aplicar la frita son similares a los que se utilizan para recubrimientos orgánicos, aunque el material inicial es muy diferente. Algunos métodos de aplicación implican mezclar la frita con agua como transporte (la mezcla se denomina ***colada***, mientras que otros métodos aplican el esmalte como un polvo seco. Las técnicas incluyen la aspersión, la aspersión electrostática, el recubrimiento por flujo, la inmersión y la electrodeposición. El cocimiento se realiza a temperaturas de 800 °C (1500 °F). El cocimiento es un proceso de ***sinterizado*** (sección 17.1.4), en el cual la frita se transforma en una porcelana vítrea no porosa. Los espesores de recubrimiento varían desde 0.075 mm (0.003 in) hasta cerca de 2 mm (0.08 in). La secuencia de procesamiento se repite varias veces para obtener el espesor deseado.

Además de la porcelana, se usan otras cerámicas como recubrimientos para propósitos especiales. Por lo general, estos recubrimientos tienen un alto contenido de alúmina, que los hace más convenientes para aplicaciones refractarias. Las técnicas para aplicar los recubrimientos son similares a las anteriores, excepto porque las temperaturas de cocimiento son más altas.

29.7 PROCESOS DE RECUBRIMIENTO TÉRMICOS Y MECÁNICOS

Estos procesos aplican recubrimientos aislados que, por lo general, son más gruesos que aquéllos depositados mediante los otros procesos considerados en este capítulo. Se basan en energía térmica o mecánica.

29.7.1 Procesos de recubrimiento térmico

Éstos usan energía térmica en diversas formas para aplicar un recubrimiento cuya función es proporcionar resistencia contra la corrosión, la erosión, el desgaste y la oxidación a altas temperaturas.

Aspersión térmica En la ***aspersión térmica*** se aplican materiales de recubrimiento fundidos y semifundidos sobre un sustrato, donde se solidifican y adhieren a la superficie. Puede aplicarse una amplia variedad de materiales de recubrimiento; las categorías son metales puros y aleaciones metálicas; cerámicas (óxidos, carburos y ciertos vidrios); otros compuestos metálicos (sulfuros, silícicos); compuestos de cermet y ciertos plásticos (epóxicos, naylon, teflón y otros). Los sustratos incluyen metales, cerámicas, vidrios, algunos plásticos, madera y papel. No todos los recubrimientos pueden aplicarse a todos los sustratos. Cuando el proceso se usa para aplicar un recubrimiento metálico, se utilizan los términos ***metalización*** o ***aspersión metálica***.

Las tecnologías usadas para calentar el material de recubrimiento son la flama de oxígeno y gas combustible, el arco eléctrico y el de plasma. El material para recubrimiento

inicial se encuentra en forma de alambre o varilla, o polvos. Cuando se usa alambre (o varilla), la fuente de calentamiento funde el extremo conductor del alambre y lo separa de la materia prima sólida. Después, el material fundido se atomiza mediante una corriente de gas a alta velocidad (aire comprimido u otra fuente), y las gotas chocan contra la superficie de trabajo. Cuando se usa materia prima en polvo, un alimentador de polvos coloca las partículas finas dentro de una corriente de gas, la cual las transporta dentro de la flama donde se funden. Los gases que se expanden en la flama impulsan los polvos fundidos (o semifundidos) contra la pieza de trabajo. El espesor del recubrimiento en la aspersión térmica generalmente es más grande que en otros procesos de deposición; el rango típico va de 0.05 a 2.5 mm (0.002 a 0.100 in).

Las primeras aplicaciones del recubrimiento por aspersión térmica fueron para reconstruir áreas gastadas en componentes de maquinaria usada y recuperar piezas de trabajo maquinadas a un tamaño menor al necesario. El éxito de esta técnica ha conducido a su aplicación en la manufactura como un proceso de recubrimiento para resistencia a la corrosión, protección contra las altas temperaturas, resistencia al desgaste, conductividad eléctrica, resistencia eléctrica, recubrimiento ante la interferencia electromagnética y otras funciones.

Revestimiento duro El ***revestimiento duro*** es un técnica de recubrimiento en la que se aplican aleaciones a los metales del sustrato, como depósitos soldados. Lo que distingue al revestimiento duro es que ocurre una fusión entre el revestimiento y el sustrato, mientras que en la aspersión térmica sucede un entrelazado mecánico, el cual no es resistente al desgaste abrasivo. Por lo tanto, el revestimiento duro es muy conveniente para aplicaciones que requieren buena resistencia contra el desgaste. Las aplicaciones incluyen el recubrimiento de piezas nuevas y la reparación de superficies de piezas usadas muy desgastadas, erosionadas o corroídas. Una ventaja del revestimiento duro que debe mencionarse es que se realiza con facilidad fuera del ambiente de fábrica relativamente controlado, mediante muchos de los procesos de soldadura comunes, como la soldadura con gas oxiacetileno y la soldadura con arco. Algunos de los materiales para recubrimiento comunes son el acero y las aleaciones de hierro, las aleaciones basadas en cobalto y las aleaciones basadas en níquel. En general, el espesor del recubrimiento está en el rango de 0.75 a 2.5 mm (0.030 a 0.125 in), aunque son posibles espesores hasta de 9 mm (3/8 in).

Procesos de revestimiento flexible El proceso de revestimiento flexible es capaz de depositar un material de recubrimiento muy duro, como el carburo de tungsteno (WC), sobre la superficie de un sustrato. Ésta es una ventaja importante del proceso en comparación con otros métodos, lo que permite una dureza en el recubrimiento de hasta 70, en la escala de Rockwell C. El proceso también se usa para aplicar recubrimientos a regiones específicas en una pieza de trabajo. En el ***proceso de revestimiento flexible***, se coloca una tela impregnada con polvos cerámicos o metálicos duros y otra impregnada con una aleación de soldadura blanda sobre un sustrato; ambas se calientan para fundir los polvos sobre la superficie. El espesor del recubrimiento para el revestimiento generalmente está entre 0.25 y 2.5 mm (0.010 y 0.100 in). Además de los recubrimientos de WC y WC-Co, también se aplican aleaciones basadas en cobalto y en níquel. Las aplicaciones incluyen los dientes de sierras de cadena, brocas de taladro para roca, collarines de taladros de perforación, troqueles de extrusión y piezas similares que requieren buena resistencia contra el desgaste.

29.7.2 Chapeado mecánico

En este proceso de recubrimiento, se usa energía mecánica para construir un recubrimiento metálico sobre la superficie. En el ***chapeado mecánico***, se frotan en un tambor las piezas que se van a recubrir, junto con polvos metálicos para chapeado, cuentas de vidrio y productos químicos especiales para promover la acción del recubrimiento. Los polvos metálicos son de tamaño microscópico: 5 μm (0.0002 in) de diámetro, mientras que las cuentas de vidrio son mucho más grandes: 2.5 mm (0.10 in) de diámetro. Conforme se frota la mezcla, la

energía mecánica del tambor rotatorio se transmite a través de las cuentas de vidrio para golpear los polvos metálicos contra la superficie de la pieza, lo que ocasiona una unión mecánica o metalúrgica. Los metales depositados deben ser maleables para obtener una unión satisfactoria con el sustrato. Entre los metales para chapeado están el zinc, el cadmio, el estaño y el plomo. El término ***galvanizado mecánico*** se usa para las piezas recubiertas con zinc. Los metales ferrosos son los que se recubren con mayor frecuencia; otros metales a los que se aplica el proceso son el latón y el bronce. Las aplicaciones típicas incluyen sujetadores tales como tornillos, pernos, tuercas y clavos. Normalmente, el espesor en el chapeado mecánico está entre 0.005 y 0.025 mm (0.0002 y 0.001 in). El zinc se chapea en forma mecánica a un espesor aproximado de 0.075 mm (0.003 in).

REFERENCIAS

[1] Budinski, K. G., ***Surface Engineering for Wear Resistance***, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1988.

[2] Durney, L.J. (ed.), ***The Graham's Electroplating Engineering Handbook***, 4a. ed., Chapman & Hall, Londres, 1996.

[3] George, J., ***Preparation of Thin Films***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1992.

[4] Hocking, M. G., Vasantasree, V. y Sidky, P. S., ***Metallic and Ceramic Coatings***, Addison-Wesley Longman, Ltd., Reading, Mass., 1989.

[5] ***Metal Finishing***, Guidebook and Directory Issue, Metals and Plastics Publications, Inc., Hackensack, N.J., 2000.

[6] ***Metals Handbook***, 9a. ed., Vol. 5, ***Surface Cleaning, Finishing, and Coating***. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982.

[7] Morosanu, C. E., ***Thin Films by Chemical Vapour Deposition***, Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1990.

[8] Murphy. J. A. (ed.), ***Surface Preparation and Finishes for Metals***, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1971.

[9] Satas, D. (ed.), ***Coatings Technology Handbook***, 2a. ed. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 2000.

[10] Stuart, R. V, ***Vacuum Technology, Thin Films, and Sputtering***, Academic Press, Nueva York, 1983.

[11] Sze, S. M., ***VLSI Technology***, 2a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1988.

[12] Tucker, Jr., R. C, "Considerations in the Selection of Coatings", ***Advanced Materials & Processes***, marzo de 2004, pp. 25-28.

[13] Wick. C. y Veilleux, R. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol III, ***Materials, Finishes, and Coating***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

29.1. ¿Por que se recubren los metales?

29.2. Identifique los tipos más comunes de procesos de recubrimiento.

29.3. En la galvanoplastia, ¿qué significa el término eficiencia del cátodo?

29.4. ¿Cuáles son los dos mecanismos básicos de protección contra la corrosión?

29.5. ¿Cuál es el metal de sustrato más común para chapeado?

29.6. Uno de los tipos de mandril en el electroformado es el sólido. ¿Cómo se remueve la pieza de un mandril sólido?

29.7. ¿En qué son diferentes el chapeado sin electricidad y el chapeado electroquímico?

29.8. ¿Qué es un recubrimiento por conversión?

29.9. ¿En qué es diferente el anodizado de otros procesos de conversión?

29.10. ¿Qué es la deposición física de vapor?

29.11. ¿Cuál es la diferencia entre deposición física de vapor (PVD) y deposición química de vapor (CVD)?

29.12. ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones de la PVD?

29.13. Mencione los tres tipos básicos de PVD.

29.14. Mencione el material para recubrimiento de uso común que se deposita mediante PVD sobre herramientas de corte.

29.15. Defina lo que es el bombardeo con partículas.

29.16. ¿Cuáles son algunas de las ventajas de la deposición química de vapor?

29.17. ¿Cuáles son los dos compuestos de titanio más comunes con los que se recubren las herramientas de corte mediante deposición química de vapor?

29.18. Identifique los cuatro tipos de ingredientes principales en los recubrimientos orgánicos.

29.19. ¿Qué significa el término eficiencia de transferencia en la tecnología de recubrimiento orgánica?

29.20. Describa los métodos principales mediante los cuales se aplican recubrimientos orgánicos a una superficie.

29.21. Los términos secado y curado tienen un significado distinto: indique la diferencia.

29.22. En el esmaltado en porcelana, ¿qué es la frita?

29.23. ¿A qué se refiere el término galvanizado mecánico?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

29.1. ¿Cuál de los siguientes metales para recubrimiento produce la superficie más dura en un sustrato metálico?: *a*) el cadmio, *b*) el cromo, *c*) el cobre, *d*) el níquel o *e*) el estaño.

29.2. ¿Cuál de los siguientes metales para recubrimiento se asocia con el término galvanizado?: *a*) hierro, *b*) plomo, *c*) acero, *d*) estaño o *e*) zinc.

29.3. ¿Cuál de los siguientes procesos implica reacciones electroquímicas? (dos son respuestas correctas): *a*) anodizado, *b*) recubrimientos cromados, *c*) chapeado sin electricidad, *d*) galvanoplastia y *e*) recubrimientos con fosfato.

29.4. ¿Cuál de los siguientes metales se asocia más frecuentemente con el anodizado? (una respuesta): *a*) aluminio, *b*) magnesio, *c*) acero, *d*) titanio o *e*) zinc.

29.5. El bombardeo con partículas es una forma de alguno de los siguientes procesos, ¿cuál?: *a*) deposición química de vapor, *b*) defecto en soldadura con arco eléctrico, *c*) difusión, *d*) implantación iónica o *e*) deposición física de vapor.

29.6. ¿Cuál de los siguientes gases es el que se usa con mayor frecuencia en el bombardeo con partículas y el chapeado iónico? *a*) argón, *b*) cloro, *c*) neón, *d*) nitrógeno o *e*) oxígeno.

29.7. ¿Cuál de las siguientes acciones usa el proceso de Mond? *a*) deposición química de vapor de nitruro de silicio sobre silicio, *b*) un proceso de galvanoplastia, *c*) deposición física de vapor para recubrir herramientas de corte con TiN o *d*) reducir carbonilo de níquel a Ni metálico.

29.8. ¿Cuál de los siguientes procesos de película delgada es el más común en el procesamiento de semiconductores? *a*) deposición química de vapor o *b*) deposición física de vapor.

29.9. ¿Cuáles de los siguientes son los métodos principales para aplicar recubrimientos pulverizados? (las dos mejores respuestas): *a*) aplicación con brocha, *b*) aspersión electrostática, *c*) cama fluidizada, *d*) inmersión o *e*) recubrimiento con rodillos.

29.10. ¿En cuál de las siguientes formas se aplica esmaltado a una superficie? *a*) emulsión líquida, *b*) solución líquida, *c*) líquido fundido o *d*) polvos.

29.11. ¿Cuáles de los siguientes son nombres alternativos para la aspersión térmica? (dos respuestas correctas): *a*) proceso de recubrimiento flexible, *b*) revestimiento duro, *c*) metalizado y *d*) aspersión metálica.

29.12. ¿Cuál de los siguientes procesos básicos se utiliza en el revestimiento duro?: *a*) soldadura con arco, *b*) soldadura dura, *c*) recubrimiento por inmersión, *d*) galvanoplastia o *e*) deformación mecánica para endurecer la superficie del trabajo.

PROBLEMAS

Galvanoplastia

29.1. ¿Qué volumen (cm^3) y qué peso (*g*) de zinc se depositará en una pieza de trabajo catódica si se aplican 10 amps de corriente durante una hora?

29.2. Se chapeará con zinc una pieza de lámina metálica de acero con un área superficial = 100 cm^2. ¿Qué espesor de recubrimiento promedio se producirá si se aplican 15 amps durante 12 minutos en una solución electrolítica de cloruro?

29.3. Se chapeará con cromo una pieza de lámina metálica de acero con un área superficial de 15.0 in^2. ¿Qué espesor de recubrimiento promedio se producirá si se aplican 15 amps durante 10 minutos de un baño con sulfato de ácido crómico?

29.4. Veinticinco piezas de joyería, cada una con un área superficial de 0.5 in^2, se chapearán con oro en una operación de chapeado por lotes. *a*) ¿Qué espesor de chapeado promedio resultará si se aplican 8 amps durante 10 min en un baño de cianuro? *b*) ¿Cuál es el valor del oro que se depositará sobre cada pieza si una onza de oro está valuada en $300? La densidad del oro = 0.698 lb/in^3.

29.5. Se recubrirá con níquel una pieza de hoja de acero. La pieza es una placa plana rectangular con un espesor de 0.075 cm y cuya cara mide 14 cm por 19 cm. La operación de chapeado se realiza en un electrólito de sulfato ácido, usando una corriente de 20 amps con una duración de 30 min. Determine el espesor promedio del metal chapeado que resulta de esta operación.

29.6. Una pieza de lámina metálica de acero tiene un área superficial total de 36 in^2. ¿Cuánto tiempo se requerirá para depositar un recubrimiento de cobre (suponga una valencia = +1) cuyo espesor es de 0.001 in sobre la superficie, si se aplican 15 amps de corriente?

29.7. Se aplica un incremento de corriente a la superficie de una pieza de trabajo en un proceso de galvanoplastia de acuerdo con la siguiente relación $I = 12.0 + 0.2t$, donde I = corriente, amps; y t = tiempo, min. El metal de chapeado es el cromo y la pieza se sumerge en la solución para chapeado durante 20 min. ¿Qué volumen de recubrimiento se aplicará en el proceso?

29.8. Se va a chapear con níquel un lote de 100 piezas en una operación de chapeado en tambor. Las piezas son idénticas, todas con un área superficial de 7.8 in^2. El proceso de chapeado aplica una corriente de 120 amps y el lote requiere 40 min para completarse. Determine el espesor del chapeado promedio en las piezas.

29.9. Se va a chapear con cromo un lote de 40 piezas idénticas usando anaqueles. Cada pieza tiene un área superficial de 22.7 cm^2. Si se desea chapear con un espesor promedio de 0.010 mm sobre la superficie de cada pieza, ¿cuánto tiempo deberá durar la operación de chapeado si se aplica una corriente de 80 amps?

Parte VIII

Procesos de unión y ensamble

30 FUNDAMENTOS DE SOLDADURA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En esta parte del libro, se consideran los procesos que se utilizan para unir dos o más piezas en una entidad ensamblada. Éstos se identifican en el tronco inferior de la figura 1.4. Por lo general, el término ***unión*** generalmente se usa para la soldadura fuerte, la dura, la suave y el pegado adhesivo, que forman entre las piezas una unión que no puede separarse con facilidad. El término ***ensamble*** se refiere usualmente a los métodos mecánicos para juntar dos piezas. Algunos de ellos permiten un desensamble sencillo, mientras que otros no. El ensamble mecánico se cubre en el capítulo 33. La soldadura dura, la suave y el pegado adhesivo se analizan en el capítulo 32. Se inicia la cobertura de los procesos de unión y ensamble con la soldadura que se analiza en este capítulo y el siguiente.

La ***soldadura*** es un proceso de unión de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos o más piezas mediante la aplicación conveniente de calor y/o presión. Muchos procesos de soldadura se obtienen solamente por calor, sin aplicar presión; otros mediante una combinación de calor y presión; y otros más, únicamente por presión, sin suministrar calor externo. En algunos procesos de soldadura se agrega un material de ***relleno*** para facilitar la fusión. El ensamblaje de partes que se unen mediante soldadura se denomina ***ensamblaje soldado***. La soldadura se asocia por lo regular con piezas metálicas, pero el proceso también se usa para unir plásticos. El análisis de la soldadura en este texto se enfocará en la unión de metales.

La soldadura es un proceso relativamente nuevo (nota histórica 30.1). Su importancia comercial y tecnológica se deriva de lo siguiente:

- La soldadura proporciona una unión permanente. Las piezas soldadas se convierten en una sola entidad.
- La unión soldada puede ser más fuerte que los materiales originales, si se usa un metal de relleno que tenga propiedades de resistencia superiores a las de los materiales originales y si se emplean las técnicas de soldadura adecuadas.
- Por lo general, la soldadura es la forma más económica de unir componentes, en términos del uso de materiales y costos de fabricación. Los métodos mecánicos alternativos de ensamble requieren alteraciones más complejas de las formas (por ejemplo, el taladrado de orificios) y la adición de sujetadores (por ejemplo, remaches o tuercas). Usualmente, el ensamble mecánico resultante es más pesado que la soldadura correspondiente.
- La soldadura no se limita al ambiente de fábrica. Puede realizarse "en el campo".

Aunque la soldadura tiene las ventajas indicadas, también tiene ciertas limitaciones y desventajas (o desventajas potenciales):

- La mayoría de las operaciones de soldadura se realizan en forma manual y son caras en términos de costo de mano de obra. Muchas operaciones de soldadura se consideran "rutinas especializadas" y la mano de obra para realizar estas operaciones puede ser escasa.
- La mayoría de los procesos de soldadura son inherentemente peligrosos debido a que implican el uso de mucha energía.
- Como la soldadura logra una unión permanente entre los componentes, no permite un desensamble adecuado. Si se requiere un desensamble ocasional de producto (para reparación o mantenimiento), no debe usarse la soldadura como método de ensamble.
- La unión soldada puede tener ciertos defectos de calidad que son difíciles de detectar y que pueden reducir la resistencia de la unión.

Nota histórica 30.1 *Orígenes de la soldadura.*

Aunque la soldadura se considera un proceso relativamente nuevo tal como se practica en la actualidad, sus orígenes se remontan a épocas antiguas. Alrededor del año 1000 a.C., los egipcios y otros pueblos en el área oriental del Mediterráneo aprendieron a obtener la soldadura por forjado (sección 31.5.2). Como una extensión natural del forjado térmico, la usaron para fabricar armas, herramientas y otros implementos. Los arqueólogos han recuperado artículos de bronce soldados por forjado de las pirámides de Egipto. Desde estos comienzos hasta la Edad Media, el comercio de soldadura por forjado llevó el arte de la soldadura por martilleo a un alto nivel de madurez. En India y Europa se han encontrado objetos de hierro y otros metales soldados que datan de esos tiempos.

No fue sino hasta el siglo XIX cuando se establecieron las bases tecnológicas de la soldadura moderna. Durante este periodo se hicieron dos descubrimientos importantes, ambos atribuidos al científico inglés sir Humphrey Davy: 1) el arco eléctrico y 2) el gas acetileno.

Alrededor de 1801, Davy observó que podía generarse un arco eléctrico entre dos electrodos de carbono. Sin embargo, no fue sino hasta mediados del siglo XIX, cuando hubo la corriente eléctrica suficiente para sostener la soldadura con arco, cuando se inventó el generador eléctrico Fue el ruso Nikolai Benardos, que preparaba un laboratorio en Francia, quien obtuvo una serie de patentes para el proceso de soldadura con arco de carbono (una en Inglaterra en 1885 y otra en Estados Unidos en 1887). A finales de ese siglo, la soldadura con arco de carbono se había convertido en un proceso comercial muy popular para unir metales.

Los inventos de Benardos parecen haberse limitado a la soldadura con arco de carbono. En 1892, el estadounidense Charles Coffin obtuvo una patente en Estados Unidos por el invento de un proceso de soldadura con arco eléctrico, utilizando un electrodo de metal. La característica singular fue que el electrodo agregó un relleno de metal a la unión soldada (el proceso de soldadura con arco de carbono no deposita un material de relleno). Después se concibió la idea de recubrir el electrodo de metal (para proteger el proceso de soldadura de la atmósfera), y desde alrededor de 1900 se hicieron mejoras al proceso de soldadura con arco eléctrico metálico en Inglaterra y Suecia.

Entre 1885 y 1900, E. Thompson desarrolló varias formas de soldadura por resistencia. Éstas incluyen la soldadura de puntos y la de costura, dos métodos de unión que se usan ampliamente en la actualidad en el procesamiento de láminas de metal.

Aunque Davy descubrió el gas acetileno a principios del siglo XIX, la soldadura con oxígeno y gas combustible requirió el invento posterior de sopletes para combinar el acetileno y el oxígeno, alrededor de 1900. Durante la década de 1890, se mezclaron el hidrógeno y el gas natural con el oxígeno para soldadura, pero la flama obtenida con el oxiacetileno obtuvo temperaturas significativamente más altas.

Los procesos de soldadura con arco, soldadura por resistencia y soldadura con oxígeno y gas combustible constituyen por mucho la mayoría de las operaciones de soldadura que se ejecutan en la actualidad.

30.1 PERSPECTIVA DE LA TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA

La soldadura implica la fusión o unión localizada de dos piezas metálicas en sus ***superficies de empalme***. Éstas son las superficies de la pieza que están en contacto o muy cercanas para ser unidas. Por lo general, la soldadura se realiza sobre piezas hechas del mismo metal, pero es posible usar algunas operaciones para unir metales diferentes.

30.1.1 Tipos de procesos de soldadura

La American Welding Society ha catalogado más de 50 tipos diferentes de operaciones de soldadura que utilizan diversos tipos o combinaciones de energía para proporcionar la energía requerida. Los procesos de soldadura pueden dividirse en dos grupos principales: 1) soldadura por fusión y 2) soldadura de estado sólido.

Soldadura por fusión Los procesos de ***soldadura por fusión*** usan calor para fundir los metales base; en muchas de las operaciones se agrega un metal de relleno a la combinación fundida para facilitar el proceso y proporcionar volumen y resistencia a la unión soldada. Una operación de soldadura por fusión en la cual no se agrega un metal de relleno se denomina soldadura ***autógena***. La categoría por fusión incluye los procesos de soldadura de uso más amplio, los cuales pueden organizarse en los siguientes grupos generales (las iniciales entre paréntesis son designaciones en inglés, de la American Welding Society):

- ➢ ***Soldadura con arco*** (AW). Se refiere a un grupo de procesos de soldadura en los cuales el calentamiento de los metales se obtiene mediante un arco eléctrico, como se muestra en la figura 30.1. Algunas de las operaciones de soldadura con arco también aplican presión durante el proceso, y la mayoría utiliza un metal de relleno.
- ➢ ***Soldadura por resistencia*** (RW). Se obtiene la fusión usando el calor de una resistencia eléctrica para el flujo de una corriente que pasa entre las superficies de empalme de dos piezas sostenidas juntas bajo presión.

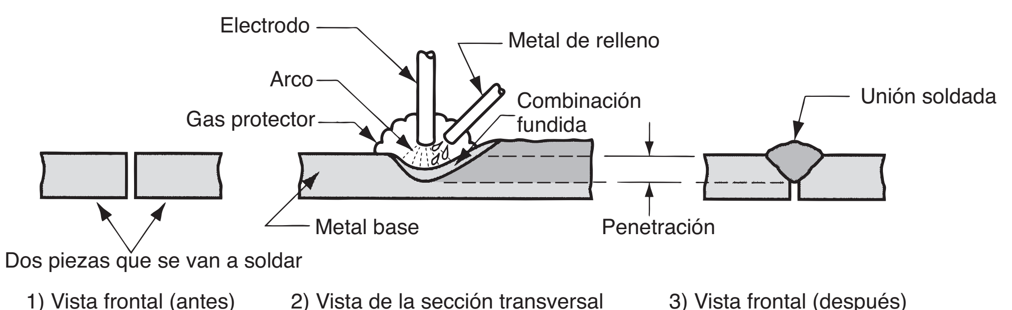


FIGURA 30.1 Fundamentos de la soldadura con arco: 1) antes de la soldadura, 2) durante la soldadura (se funde el metal base y se agrega el metal de relleno a la combinación fundida, y 3) la soldadura terminada. Existen muchas variaciones del proceso de soldadura con arco.

- ***Soldadura con oxígeno y gas combustible*** (OFW). Estos procesos de unión usan un gas de oxígeno combustible, tal como una mezcla de oxígeno y acetileno, para producir una flama caliente para fundir la base metálica y el metal de relleno, en caso de que se utilice alguno.
- Otros procesos de soldadura por fusión. Además de los tipos anteriores, hay otros procesos de soldadura que producen la fusión de los metales unidos; como ejemplo pueden mencionarse la ***soldadura con haz de electrones*** y la ***soldadura con rayo láser.***

También se usan ciertos procesos de arco y de oxígeno y gas combustible para cortar metales (secciones 26.3.4 y 26.3.5).

Soldadura de estado sólido La ***soldadura de estado sólido*** se refiere a los procesos de unión en los cuales la fusión proviene sólo de la aplicación de presión o de una combinación de calor y presión. Si se usa calor, la temperatura del proceso está por debajo del punto de fusión de los metales que se van a soldar. En los procesos de estado sólido no se utiliza un metal de relleno. Algunos procesos representativos de soldadura en este grupo son los siguientes:

- ***Soldadura por difusión*** (DFW). Se colocan juntas dos superficies bajo presión a una temperatura elevada y las piezas se sueldan por medio de fusión de estado sólido.
- ***Soldadura por fricción*** (FRW). En este proceso, la coalescencia se obtiene mediante el calor de la fricción entre dos superficies.
- ***Soldadura ultrasónica*** (USW). Se realiza aplicando una presión moderada entre las dos piezas y un movimiento oscilatorio a frecuencias ultrasónicas en una dirección paralela a las superficies de contacto. La combinación de las fuerzas normales y vibratorias produce intensas tensiones que remueven las películas superficiales y obtienen la unión atómica de las superficies.

En el capítulo 31 se describen los diferentes procesos de soldadura con mayor detalle. La exploración anterior proporciona una referencia suficiente para el análisis de la terminología y los principios de soldadura que se incluyen en este capítulo.

30.1.2 La soldadura como una operación comercial

Las principales aplicaciones de la soldadura son: 1) la construcción, por ejemplo, edificios y puentes; 2) la producción de tuberías, recipientes a presión, calderas y tanques de almacenamiento; 3) la construcción naval; 4) las industrias aeronáutica y espacial; y 5) los automóviles y los ferrocarriles [4]. La soldadura se realiza en diferentes instalaciones y en diversas industrias. Debido a su versatilidad como técnica de ensamble para productos comerciales, muchas operaciones de soldadura se ejecutan en fábricas. Sin embargo, varios de los procesos de soldadura tradicionales, tales como la soldadura con arco eléctrico y la soldadura con oxígeno y gas combustible, emplean equipo que se mueve con facilidad, por lo que estas operaciones no se limitan a la fábrica. Pueden realizarse en lugares de construcción, en patios, en las instalaciones de un cliente y en los talleres de reparación de automóviles.

La mayoría de las operaciones de soldadura requiere un trabajo intenso. Por ejemplo, la soldadura con arco eléctrico la realiza un trabajador calificado, llamado ***soldador***, quien controla manualmente la trayectoria o colocación de la soldadura para unir piezas individuales en una unidad más grande. En las operaciones de fábrica donde se realiza la soldadura con arco en forma manual, con frecuencia el soldador trabaja con un segundo trabajador, llamado ***ajustador***. El trabajo del ajustador es ordenar los componentes individuales para el soldador antes de practicar la soldadura. Se usan sujetadores y posicionadores de soldadura para ayudar en esta función. Un ***sujetador de soldadura*** es un dispositivo para asegurar y sostener los componentes en una posición fija para la soldadura. Esta instalación se fabrica sobre pedido para la forma particular de la soldadura y, por lo tanto, debe tener una justificación económica con base en la cantidad de ensambles que se van a producir. Un ***posicionador de soldadura*** es un dispositivo que sostiene las piezas y también mueve el ensamble a la posición deseada para soldar. La diferencia entre este dispositivo y

un sujetador de soldadura es que sostiene las piezas en una sola posición fija. Por lo general, la posición deseada es aquélla en la que la trayectoria de soldadura es plana y horizontal.

El aspecto de seguridad La soldadura es inherentemente peligrosa para los trabajadores. Quienes ejecutan estas operaciones deben tomar estrictas medidas de seguridad. Las altas temperaturas de los metales fundidos en la soldadura son un peligro obvio. En la soldadura con gas, los combustibles (por ejemplo, el acetileno) corren el riesgo de incendiarse. La mayoría de los procesos usan mucha energía para producir la fusión de las superficies de las piezas que se van a unir. En muchos procesos de soldadura, la corriente eléctrica es la fuente de energía térmica, por lo que existe el riesgo de una descarga eléctrica para el trabajador. Ciertos procesos de soldadura tienen sus propios peligros particulares. Por ejemplo, en la soldadura con arco eléctrico, se emite radiación ultravioleta, la cual es peligrosa para los ojos. El soldador debe usar una careta especial que incluye una ventana oscura con un filtro. Esta ventana filtra la radiación peligrosa, pero es tan oscura que deja al soldador virtualmente ciego, excepto cuando se descarga el arco eléctrico. Las chispas y las salpicaduras de metal fundido, el humo y los vapores aumentan los riesgos asociados con las operaciones de soldadura. Deben usarse instalaciones ventiladas para extraer los vapores peligrosos que generan algunos de los fluidos y metales fundidos que se usan en la soldadura. Si la operación se realiza en un área cerrada, se requiere de trajes o capuchas con ventilación especial.

Automatización en la soldadura Debido a los riesgos de la soldadura manual y a los esfuerzos de aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos, se han creado diversas formas de mecanización y automatización. Las categorías incluyen la soldadura con máquina, la soldadura automática y la soldadura robótica.

La ***soldadura con máquina*** puede definirse como una soldadura mecanizada con equipo que realiza la operación bajo la supervisión continua de un operador. Normalmente se realiza mediante una cabeza para soldadura que se mueve por medios mecánicos en relación con el trabajo estacionario, o moviendo el trabajo en relación con la cabeza de soldadura estacionaria. El trabajador humano debe observar continuamente e interactuar con el equipo para controlar la operación.

Si el equipo es capaz de realizar la operación sin el ajuste de los controles por parte de un operador humano, se denomina ***soldadura automática***. Un trabajador casi siempre está presente para vigilar el proceso y detectar variaciones de las condiciones normales. Lo que distingue la soldadura automática de la soldadura con máquina es un controlador del ciclo de soldadura para regular el movimiento del arco eléctrico y la posición de la pieza de trabajo sin atención humana continua. La soldadura automática requiere un sujetador o un posicionador de soldadura para colocar el trabajo en relación con la cabeza de soldadura. También se requiere un mayor grado de consistencia y precisión en las piezas componentes usadas en el proceso. Por estas razones, la soldadura automática sólo se justifica para grandes producciones.

En la ***soldadura robótica*** se usa un robot industrial o un manipulador programable que controla en forma automática el movimiento de la cabeza para soldar con respecto al trabajo (sección 38.2.3). El alcance versátil del brazo del robot permite el uso de sujetadores relativamente simples, y la capacidad del robot para reprogramarse con nuevas configuraciones de las piezas permite que esta forma de automatización se justifique para cantidades de producción relativamente bajas. Una típica celda robótica de soldadura con arco consta de dos instalaciones para soldadura y un ajustador humano para cargar y descargar piezas mientras el robot efectúa la soldadura. Además de la soldadura con arco, también se usan robots industriales en las plantas de ensamble final de automóviles para realizar soldadura por resistencia sobre carrocerías (figura 39.11).

30.2 UNIÓN SOLDADA

La soldadura produce una conexión sólida entre dos piezas, denominada ***unión soldada***. Ésta es el empalme de los bordes o las superficies de las piezas que se han unido mediante solda-

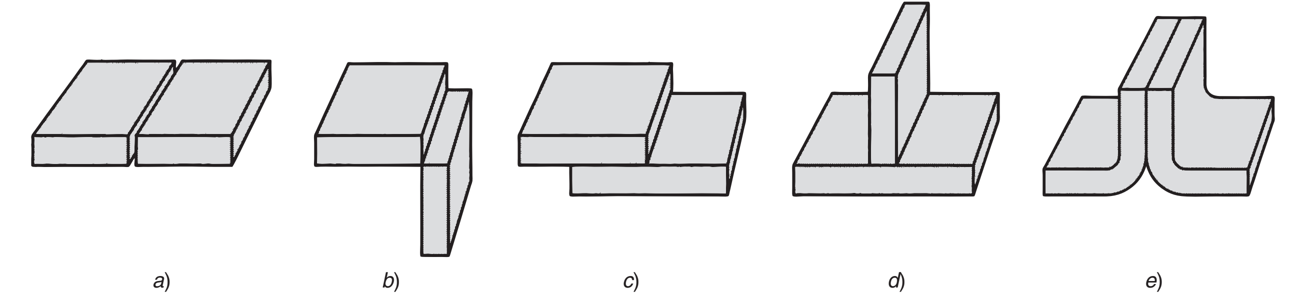


FIGURA 30.2 Cinco tipos básicos de uniones: *a*) empalmada, *b*) de esquina, *c*) superpuesta, *d*) en te y *e*) de bordes.

dura. En esta sección, se cubren dos clasificaciones relativas a las uniones soldadas: 1) tipos de uniones y 2) tipos de soldaduras que se usan para unir las piezas que forman la unión.

30.2.1 Tipos de uniones

Existen cinco tipos básicos de uniones para pegar dos piezas de una junta. Los cinco tipos de unión no están limitados a la soldadura; también se aplican a otras técnicas de unión y sujeción. De acuerdo con la figura 30.2, los cinco tipos de unión pueden definirse como sigue:

a) ***Unión empalmada***. En este tipo de unión, las piezas se encuentran en el mismo plano y se unen en sus bordes.
b) ***Unión de esquina***. Las piezas en una unión de esquina forman un ángulo recto y se unen en la esquina del ángulo.
c) ***Unión superpuesta***. Esta unión consiste en dos piezas que se sobreponen.
d) ***Unión en te***. En la unión en te, una pieza es perpendicular a la otra en una forma parecida a la letra T.
e) ***Unión de bordes***. Las piezas en una unión de bordes están paralelas con al menos uno de sus bordes en común y la unión se hace en el(los) borde(s) común(es).

30.2.2 Tipos de soldaduras

Cada una de las uniones anteriores puede hacerse mediante soldadura. Es adecuado distinguir entre el tipo de unión y el modo en que se suelda, es decir, el tipo de soldadura. Las diferencias entre los tipos de soldadura están en la forma (el tipo de unión) y el proceso de soldadura.

Se usa ***soldadura de filete*** para rellenar los bordes de las placas creadas mediante uniones de esquina, sobrepuestas y en te, como en la figura 30.3. Se usa un metal de relleno para proporcionar una sección transversal con una forma aproximada a la de un triángulo recto. Es el tipo de soldadura más común en la soldadura con arco y en la de oxígeno y gas combustible porque requiere una mínima preparación de los bordes, pues se usan los bordes cuadrados básicos de las partes. Las soldaduras de filete pueden ser sencillas o dobles (es decir, pueden soldarse en uno o ambos lados) y continuas o intermitentes (esto es, soldadas a lo largo de toda la longitud de la unión o con espacio sin soldar a lo largo de la pieza).

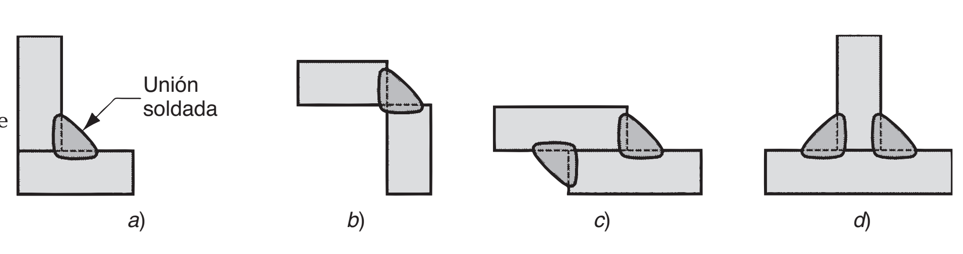


FIGURA 30.3 Diversas formas de soldaduras de filete: *a*) unión de esquina con filete interno único; *b*) unión de esquina con filete externo único; *c*) unión sobrepuesta con filete doble y *d*) unión en te con filete doble. Las líneas punteadas muestran los bordes originales de las piezas.

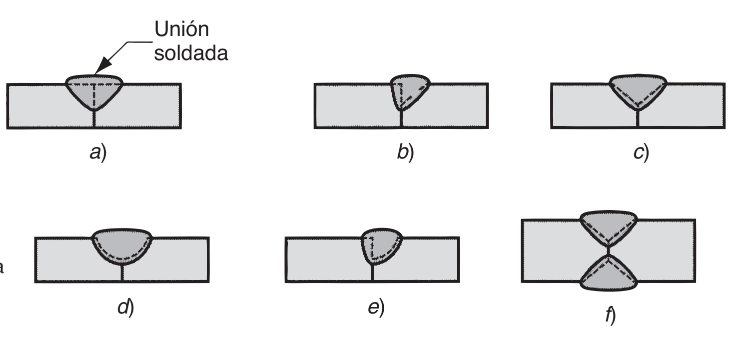


FIGURA 30.4 Algunas soldaduras con surco típicas: *a*) soldadura con surco cuadrado, un lado; *b*) soldadura con surco en bisel único; *c*) soldadura con surco en V único; *d*) soldadura con surco en U único; *e*) soldadura con surco en J único; *f*) soldadura con surco en V doble para secciones más gruesas. Las líneas punteadas muestran los bordes originales de las piezas.

Las ***soldaduras con surco*** por lo general requieren que se moldeen las orillas de las piezas en un surco para facilitar la penetración de la soldadura. Las formas con surco incluyen un cuadrado, un bisel, la V, la U y la J, en lados sencillos o dobles, como se muestra en la figura 30.4. Se usa metal de relleno para saturar la unión, por lo general, mediante soldadura con arco eléctrico o con oxígeno y gas combustible. Con frecuencia se preparan los bordes de las piezas más allá de un cuadrado básico, aunque se requiera de un procesamiento adicional, para aumentar la resistencia de la unión soldada o donde se van a soldar piezas más gruesas. Aunque se asocia más estrechamente con una unión empalmada, la soldadura con surco se usa en todos los tipos de uniones, excepto en la sobrepuesta.

Las ***soldaduras con insertos*** y las ***soldaduras ranuradas*** se usan para unir placas planas, como se muestra en la figura 30.5, usando uno o más huecos o ranuras en la pieza superior, que después se rellenan con metal para fundir las dos piezas.

En la figura 30.6 se muestran la soldadura de puntos y la soldadura de costura, usadas para uniones sobrepuestas. Una ***soldadura de puntos*** es una pequeña sección fundida entre las superficies de dos láminas o placas. Normalmente se requieren varias soldaduras de puntos para unir las piezas. Se asocia más estrechamente con la soldadura por resistencia. Una ***soldadura de costura*** es similar a una de puntos, excepto que consiste en una sección fundida más o menos continua entre las dos láminas o placas.

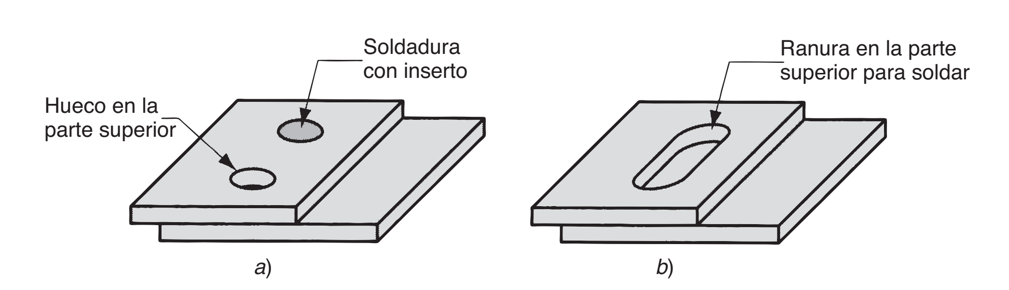
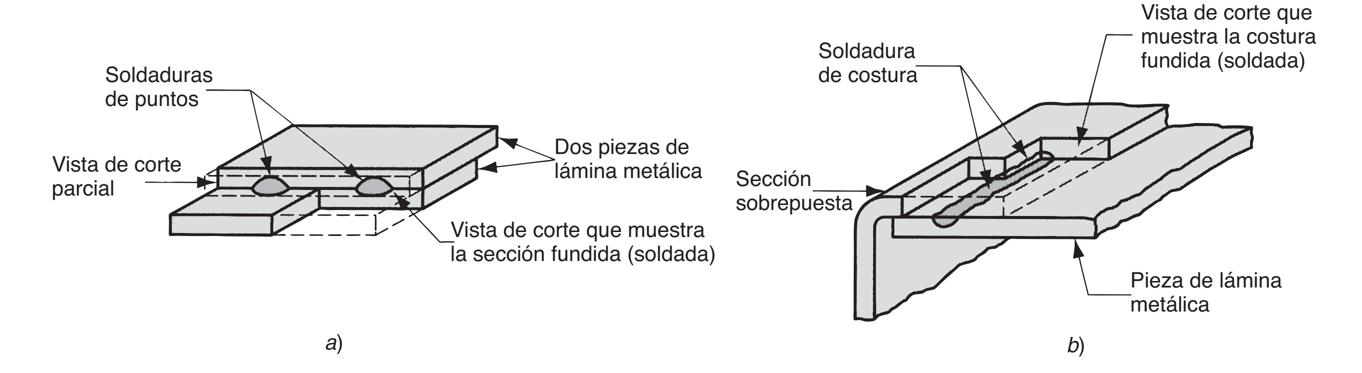


FIGURA 30.5 *a*) Soldadura con inserto y *b*) soldadura ranurada.

FIGURA 30.6 *a*) Soldadura de puntos y *b*) soldadura de costura.



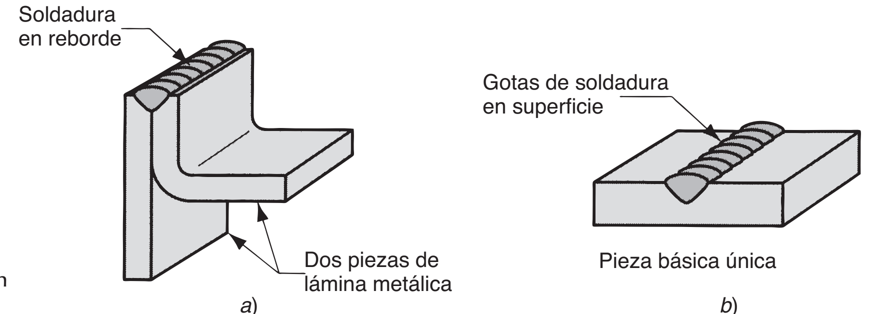


FIGURA 30.7 *a*) Soldadura en reborde y *b*) soldadura en superficie

En la figura 30.7 se muestran soldaduras en rebordes y soldaduras en superficies. Una ***soldadura en rebordes*** se hace en los bordes de dos (o más) piezas, por lo general, láminas metálicas o placas delgadas, en donde al menos una de las piezas está en un reborde, como en la figura 30.7*a*). Una ***soldadura en superficie*** no se usa para unir piezas, sino para depositar metal de relleno sobre la superficie de una pieza base en una o más gotas de soldadura. Las gotas de soldadura pueden colocarse en una serie de líneas paralelas sobrepuestas, con lo que se cubren grandes áreas de la pieza base. El propósito es aumentar el espesor de la placa o proporcionar un recubrimiento protector sobre la superficie.

30.3 FÍSICA DE LA SOLDADURA

Aunque existen varios mecanismos para lograr la coalescencia de la soldadura, la fusión es por mucho el medio más común. En esta sección se consideran las relaciones físicas que permiten la fusión de la soldadura. Primero se examina el aspecto de la densidad de potencia y su importancia y, después, se definen las ecuaciones de calor y potencia que describen un proceso de soldadura.

30.3.1 Densidad de potencia

Para lograr la fusión, se aplica una fuente de energía calorífica de alta densidad a las superficies de empalme y las temperaturas resultantes son suficientes para producir la fusión localizada de los metales base. Si se agrega un metal de relleno, la densidad calorífica debe ser suficientemente alta para fundirlo también. La densidad calorífica se define como la potencia transferida al trabajo por unidad de área superficial, W/mm^2 ($Btu/s\text{-}in^2$). El tiempo para fundir el metal es inversamente proporcional a la densidad de potencia. A bajas densidades de potencia, se requiere una gran cantidad de tiempo para producir la fusión. Si la densidad de potencia es demasiado baja, el calor se conduce al trabajo tan rápidamente como se transmite a la superficie y nunca ocurre la fusión. Se ha encontrado que la mínima densidad de potencia requerida para fundir la mayoría de los metales en la soldadura es de aproximadamente 10 W/mm^2 (6 $Btu/s\text{-}in^2$). Conforme aumenta la densidad calorífica, se reduce el tiempo de fusión. Si la densidad de potencia es demasiado alta, un poco arriba de 10^5 W/mm^2 (60 000 $But/s\text{-}in^2$), las temperaturas localizadas vaporizan el metal en la región afectada. Por lo tanto, existe un rango de valores prácticos para la densidad de potencia, dentro del cual puede ejecutarse la soldadura. Las diferencias entre los procesos de soldadura en este rango son: 1) la velocidad a la que se realiza la soldadura y/o 2) el tamaño de la región que puede soldarse. En la tabla 30.1 se proporciona una comparación de la densidad de potencia para los grupos principales de procesos de soldadura por fusión. La soldadura con oxígeno y gas combustible es capaz de generar grandes cantidades de calor, pero la densidad de calor es relativamente baja debido a que se extiende sobre un área grande. El gas oxiacetileno, el más caliente de los combustibles para la OFW, arde a una temperatura máxima de alrededor de 3500 °C (6300 °F). En comparación, la soldadura con arco produce una alta energía sobre un área más pequeña, lo que da por resultado

TABLA 30.1 Comparación de varios procesos de soldadura por fusión con base en sus densidades de potencia.

	Densidad de potencia aproximada	
Proceso de soldadura	W/mm²	Btu/s-in²
Soldadura con oxígeno y gas combustible	10	6
Soldadura con arco	50	30
Soldadura por resistencia	1 000	600
Soldadura con rayo láser	9 000	5 000
Soldadura con haz de electrones	10 000	6 000

temperaturas locales de 5500° a 6600 °C (10 000 a 12 000 °F). Por razones metalúrgicas, es conveniente fundir metales con el mínimo de energía y en general se prefieren las densidades de potencia altas.

La densidad de potencia puede calcularse como la potencia que entra a la superficie dividida entre el área superficial correspondiente:

$$PD = \frac{P}{A} \tag{28.1}$$

donde PD = densidad de potencia, W/mm² (Btu/s-in²); P = potencia que entra a la superficie, W (Btu/s); y A = área superficial por la que entra energía, mm² (in²). Este asunto resulta más complicado de lo que indica la ecuación (30.1). Una complicación es que la fuente de potencia (por ejemplo, el arco) se mueve en muchos procesos de soldadura, lo que da por resultado un calentamiento previo a la operación y un calentamiento posterior a ésta. Otra dificultad es que la densidad de potencia no es uniforme por toda la superficie afectada; se distribuye como una función del área, según lo demuestra el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 30.1 Densidad de potencia en la soldadura

Una fuente de calor transfiere 3000 W a la superficie de una pieza metálica. El calor afecta la superficie en un área circular, con intensidades variables dentro del círculo. La distribución es la siguiente: 70% de la potencia se transfiere dentro de un círculo de 5 mm de diámetro y 90% se transfiere dentro de un círculo concéntrico de 12 mm de diámetro. ¿Cuáles son las densidades de potencia en: *a*) el círculo interno de 5 mm de diámetro y *b*) el anillo con un diámetro de 12 mm que se encuentra alrededor del círculo interno?

Solución: *a*) El círculo interno tiene un área $A = \frac{\pi(12^2 - 5)^2}{4}$ = 19.63 mm².

La potencia dentro de esta área $P = 0.70 \times 3000 = 2100$ W.

Por lo tanto, la densidad de potencia $PD = \frac{2100}{19.63}$ = 107 W/mm².

b) El área del anillo exterior del círculo interno es: $A = \frac{\pi(12^2 - 5^2)}{4}$ = 93.4 mm².

La potencia en esta región es $P = 0.9(3000) - 2100 = 600$ W.

Por lo tanto, la densidad de potencia $PD = \frac{600}{93.4}$ = 6.4 W/mm².

Observación: La densidad de potencia parece lo suficientemente alta para fundir en el círculo interno, pero es probable que no sea suficiente en el anillo exterior de este círculo interno.

30.3.2 Balance de calor en la soldadura por fusión

La cantidad de calor requerida para fundir un cierto volumen de metal es la suma de: 1) el calor para elevar la temperatura del metal sólido a su punto de fusión, el cual depende

TABLA 30.2 Temperaturas de fusión sobre la escala de temperatura absoluta de metales seleccionados.

Metal	Temperatura de fusión		Metal	Temperatura de fusión	
	°K[a]	°R[b]		°K[a]	°R[b]
Aleaciones de aluminio	930	1 680	Aceros	1 760	3 160
Hierro fundido	1 530	2 760	Al bajo carbono	1 700	3 060
Cobre y aleaciones			Al medio carbono	1 650	2 960
Puro	1 350	2 440	Al alto carbono	1 700	3 060
Latón, marina	1 160	2 090	Aleación baja		
Bronce (90 Cu-10 Sn)	1 120	2 010	Aceros inoxidables		
Inconel	1 660	3 000	Austenítico	1 670	3 010
Magnesio	940	1 700	Martensítico	1 700	3 060
Níquel	1 720	3 110	Titanio	2 070	3730

Basado en los valores de [1].
[a]Escala Kelvin = temperatura en centígrados (Celsius) + 273.
[b]Escala Rankine = temperatura en Fahrenheit + 460.

del calor específico volumétrico del metal, 2) el punto de fusión del metal y 3) el calor para transformar el metal de la fase sólida a la líquida en el punto de fusión, que depende de la temperatura de fusión del metal. Para una aproximación razonable, esta cantidad de calor puede estimarse mediante la siguiente ecuación [5]:

$$U_m = KT_m^2 \tag{30.2}$$

donde U_m = la unidad de energía para fundir (es decir, la cantidad de calor requerida para fundir una unidad de volumen de metal, empezando a temperatura ambiente), J/mm^3 (Btu/in^3); T_m = punto de fusión del metal en una escala de temperatura absoluta, K (°R); y K = constante cuyo valor es 3.33×10^{-6} cuando se usa la escala Kelvin (y $K = 1.467 \times 10^{-5}$ para la escala de temperatura Rankine). Las temperaturas de fusión absoluta para los metales seleccionados se presentan en la tabla 30.2.

No toda la energía generada en la fuente de calor se usa para fundir el metal soldado. Existen dos mecanismos de transferencia de calor en el trabajo, ambos reducen la cantidad de calor disponible para el proceso de soldadura. El primer mecanismo es la transferencia de calor entre la fuente de calor y la superficie de trabajo. Este proceso tiene cierto ***factor de transferencia de calor*** f_1, definido como la razón del calor real que recibe la pieza de trabajo dividida entre el calor total que genera la fuente. El segundo mecanismo implica la conducción del calor lejos del área de soldadura para disiparse a través del metal de trabajo, por lo que sólo una porción del calor transferido a la superficie está disponible para fusión. Este ***factor de fusión*** f_2 es la proporción del calor que recibe la superficie de trabajo que puede usarse para fusión. El efecto combinado de estos dos factores reduce la energía calorífica disponible para la soldadura como sigue:

$$H_w = f_1 f_2 H \tag{30.3}$$

donde H_w = calor neto disponible para soldadura, J (Btu), f_1 = factor de transferencia de calor, f_2 = factor de fusión y H = calor total generado por el proceso de soldadura, J (Btu).

El valor de los factores f_1 y f_2 se encuentra en un rango que va de cero a uno. Resulta adecuado separar los conceptos para f_1 y f_2, aun cuando actúen juntos durante el proceso de soldadura. El factor de transferencia de calor f_1 está determinado en gran parte por el proceso de soldadura y la capacidad de convertir la fuente de potencia (por ejemplo, energía eléctrica) en un calor utilizable en la superficie de trabajo. A este respecto, los procesos de soldadura con arco son relativamente eficientes, mientras que los procesos de soldadura con oxígeno y gas combustible son relativamente ineficientes.

El factor de fusión f_2 depende del proceso de soldadura, pero también está influido por las propiedades térmicas del metal, la configuración de la unión y el espesor de la pieza. Los metales con alta conductividad térmica, como el aluminio y el cobre, representan un

problema para la soldadura, debido a la rápida disipación del calor en el momento de hacer contacto con el área de contacto. El problema aumenta con las fuentes caloríficas para soldadura que poseen bajas densidades de energía (por ejemplo, la soldadura con oxígeno y gas combustible), debido a que la entrada de calor se extiende sobre un área más grande, lo que facilita la conducción en el trabajo. En general, una alta densidad de potencia combinada con un material de trabajo de baja conductividad produce un alto factor de fusión.

Ahora puede escribirse una ecuación de equilibrio entre la entrada de energía y la energía necesaria para soldar:

$$H_w = U_m V \tag{30.4}$$

donde H_w = energía calorífica neta entregada a la operación, J (Btu); U_m = energía unitaria requerida para fundir el metal, J/mm^3 (Btu/in^3); y V = volumen de metal fundido, mm^3 (in^3).

La mayoría de las operaciones de soldadura son procesos de velocidad; esto es, la energía calorífica neta H_w se entrega a cierta velocidad y la gota de soldadura se forma a cierta velocidad de viaje. Por ejemplo, esto es característico de la mayoría de las operaciones de soldadura con arco y muchas de las actividades de soldadura con oxígeno y gas combustible. Por lo tanto, resulta adecuado expresar la ecuación (30.4) en forma de una ecuación de balance de la velocidad:

$$R_{Hw} = U_m R_{WV} \tag{30.5}$$

donde R_{Hw} = velocidad de la energía calorífica proporcionada para la operación de soldadura, J/s = W (Btu/min); y R_{WV} = velocidad volumétrica de metal soldado, en mm^3/s (in^3/min). En la soldadura de una gota continua, la velocidad volumétrica del metal soldado es el producto de área de soldadura A_w y la velocidad de viaje v. Sustituyendo estos términos en la ecuación anterior, la ecuación de balance de la velocidad ahora puede expresarse como:

$$R_{Hw} = f_1 f_2 R_H = U_m A_w v \tag{30.6}$$

donde f_1 y f_2 son los factores de transferencia de calor y de fusión; R_H = tasa de entrada de energía generada por la fuente de energía para la soldadura, W (Btu/min); A_w = área de la sección transversal de la soldadura, mm^2 (in^2); y v = la velocidad de viaje de la operación de soldadura, en mm/s (in/min). En el capítulo 31 se analiza cómo se generan la densidad de potencia en la ecuación (30.1) y la tasa de entrada de energía de la ecuación (30.6) para algunos de los procesos individuales de soldadura.

EJEMPLO 30.2
Velocidad de viaje en soldadura

La fuente de potencia en una instalación para soldadura particular es capaz de generar 3500 W que pueden transferirse a la superficie de trabajo con un factor de transferencia de calor = 0.7. El metal que se va a soldar es de acero al bajo carbono, cuya temperatura de fusión según la tabla 30.2 es de 1760 K. El factor de fusión en la operación es de 0.5. Se realizará una soldadura de filete continua con un área de sección transversal de 20 mm^2. Determine la velocidad de viaje a la cual puede realizarse la operación de soldadura.

Solución: Primero se encontrará la energía unitaria requerida para fundir el metal U_m a partir de la ecuación (30.2).

$$U_m = 3.33(10^{-6}) \times 1760^2 = 10.3 \text{ J/mm}^3$$

Si se reordena la ecuación (30.6) para despejar la velocidad de viaje, se tiene $v = \dfrac{f_1 f_2 R_H}{U_m A_w}$, y

si se resuelve para las condiciones del problema, $y = \dfrac{0.7(0.5)(3500)}{10.3(200)} = 5.95$ mm/s. ■

30.4 CARACTERÍSTICAS DE UNA JUNTA SOLDADA POR FUSIÓN

La mayoría de las uniones soldadas que se consideraron con anterioridad son soldadas por fusión. Como se ilustra en la sección transversal de la figura 30.8*a*), una junta soldada

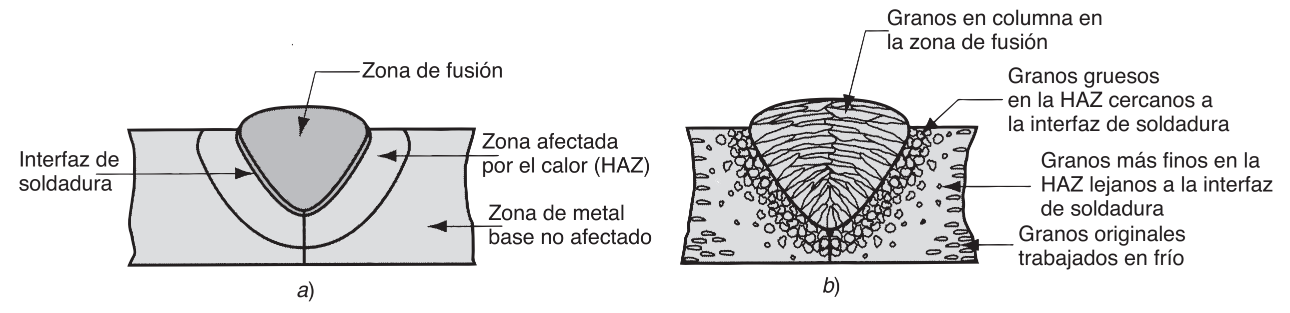


FIGURA 30.8 Sección transversal de una junta soldada por fusión típica: *a*) zonas principales en la unión y *b*) estructuras de grano típicas.

por fusión típica, a la cual se ha agregado un metal de relleno, consiste en varias zonas: 1) zona de fusión, 2) interfaz de la soldadura, 3) zona afectada por el calor y 4) zona de metal base no afectada.

La ***zona de fusión*** consiste en una mezcla de metal de aporte y de metal base que se ha fundido por completo. Esta zona se caracteriza por un alto grado de homogeneidad entre los metales componentes que se han fundido durante la soldadura. La mezcla de estos componentes está motivada en gran medida por la convección en la combinación de soldadura fundida. La solidificación en la zona de fusión se asemeja a un proceso de fundición. En la soldadura, el molde se forma por medio de los bordes o superficies no fundidos de los componentes que se están soldando. La diferencia significativa entre la solidificación en fundición y la soldadura es que en esta última ocurre un crecimiento de grano epitaxial. El lector debe recordar que durante la fundición se forman granos metálicos a partir de la fusión, mediante la nucleación de partículas sólidas en la pared de fusión, seguida por el crecimiento del grano. En contraste, en el proceso de soldadura se evita la etapa de nucleación a través del mecanismo de ***crecimiento de grano epitaxial***, en el cual los átomos de la combinación fundida se solidifican sobre los sitios reticulares preexistentes del metal base sólido adyacente. En consecuencia, la estructura del grano en el área de fusión cerca de la zona afectada por calor tiende a imitar la orientación cristalográfica de la zona afectada por calor circundante. Más allá, dentro de la zona de fusión se desarrolla una orientación preferencial, en la cual los granos están aproximadamente perpendiculares a los límites de la interface de soldadura. La estructura resultante en la zona de fusión solidificada tiende a presentar granos gruesos en columna, como se muestra en la figura 30.8*b*). La estructura del grano depende de varios factores que incluyen el proceso de soldadura, los metales que se sueldan (por ejemplo, metales idénticos contra metales diferentes), si se utiliza un metal de relleno y la velocidad de alimentación a la que se obtiene la soldadura. Un análisis detallado de la metalurgia de soldadura está más allá del enfoque de este texto, pero los lectores interesados pueden consultar varias de las referencias [3], [4], [5].

La segunda zona en la unión soldada es la ***interfaz de soldadura***, una estrecha frontera que separa la zona de fusión de la zona afectada por el calor. La interfaz consiste en una banda delgada de metal base fundido o parcialmente fundido durante el proceso de fusión (se localiza dentro de los granos), el cual se ha solidificado inmediatamente después, antes de mezclarse con el metal en la zona de fusión. Por lo tanto, su composición química es idéntica a la del metal base.

La tercera zona en la soldadura por fusión típica es la ***zona afectada por el calor*** (HAZ, por sus siglas en inglés). En esta zona, el metal ha experimentado temperaturas menores a su punto de fusión, aunque lo suficientemente altas para producir cambios microestructurales en el metal sólido. La composición química en la zona afectada por el calor es igual a la del metal base, pero esta zona ha sido tratada con calor debido a las temperaturas de soldadura, por lo que se han alterado sus propiedades y estructura. La cantidad de daño metalúrgico en la HAZ depende de factores como la cantidad de calor que ha ingresado y la temperatura pico alcanzada, la distancia de la zona de fusión, el intervalo de tiempo en el que ha estado sujeto el metal a altas temperaturas, la velocidad de enfriamiento y las

propiedades térmicas del metal. Por lo general, el efecto sobre las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor es negativo y, con frecuencia, en esta región ocurren fallas en la junta soldada.

Conforme aumenta la distancia de la zona de fusión, finalmente se alcanza la ***zona de metal base no afectada***, en la cual no ha ocurrido un cambio metalúrgico. Sin embargo, es probable que el metal base que rodea la HAZ esté en un estado de alto esfuerzo residual, ocasionado por la contracción en la zona de fusión.

REFERENCIAS

[1] Cary. H. B. y Helzer, S. C., ***Modern Welding Technology***, 6a. ed., Pearson/Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 2005.

[2] Datsko. J., ***Material Properties and Manufacturing Processes,*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1966, capítulo 4.

[3] Messler. R. W., Jr., ***Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy***, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1999.

[4] ***Metals Handbook***, 9a. ed., vol. 6, ***Welding, Brazing, and Soldering.*** ASM International, Materials Park, Ohio, 1993.

[5] ***Welding Handbook***, 8a. ed., vol. 1, ***Welding Technology***, American Welding Society, Miami, Florida, 1987.

[6] Wick, C. y Veilleux. R. F., ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. IV, ***Quality Control and Assembly***, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1987.

PREGUNTAS DE REPASO

30.1. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de la soldadura en comparación con otros tipos de operaciones de ensamble?

30.2. ¿Cuáles fueron los dos descubrimientos de Sir Humphrey Davy que condujeron al desarrollo de la tecnología de soldadura moderna?

30.3. ¿Qué significa el término superficie de empalme?

30.4. Defina el término soldadura por fusión.

30.5. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre una soldadura por fusión y una soldadura de estado sólido?

30.6. ¿Qué es una soldadura autógena?

30.7. Analice las razones por las que casi todas las operaciones de soldadura son inherentemente peligrosas.

30.8. ¿Cuál es la diferencia entre la soldadura con máquina y la soldadura automática?

30.9. Mencione y dibuje los cinco tipos de uniones.

30.10. Defina y dibuje una soldadura de filete.

30.11. Defina y dibuje una soldadura con surco.

30.12. ¿Por qué es diferente una soldadura en superficie a otros tipos de soldadura?

30.13. ¿Por qué es deseable usar fuentes de energía para soldadura que tengan densidades caloríficas altas?

30.14. ¿Qué es la energía de fusión unitaria en la soldadura y cuáles son los factores de los que depende?

30.15. Defina y distinga los términos factor de transferencia de calor y factor de fusión en la soldadura.

30.16. ¿Qué es la zona afectada por el calor (HAZ) en una soldadura por fusión?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 14 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

30.1. Sólo puede ejecutarse una soldadura sobre metales que tienen el mismo punto de fusión; de lo contrario, el metal con la temperatura de fusión más baja siempre se derrite mientras que el otro permanece sólido: *a*) verdadero o *b*) falso.

30.2. Una soldadura de filete puede usarse para unir ¿cuál de los siguientes tipos de junta? (tres respuestas correctas): *a*) empalmada, *b*) de esquina, *c*) de bordes, *d*) superpuesta, *e*) en te.

30.3. Una soldadura de filete tiene una forma de sección transversal que es aproximadamente: *a*) rectangular, *b*) redonda, *c*) cuadrada o *d*) triangular.

30.4. Las soldaduras con surco se asocian más estrechamente con ¿cuál de los siguientes tipos de unión?: *a*) empalmada, *b*) de esquina, *c*) de bordes, *d*) superpuesta o *e*) en te.

30.5. Una soldadura de reborde se asocia más estrechamente con ¿cuál de los siguientes tipos de unión? *a*) empalmada, *b*) de esquina, *c*) de bordes, *d*) sobrepuesta o *e*) en te.

30.6. Por razones metalúrgicas, resulta deseable fundir el metal de soldadura con el mínimo ingreso de energía. ¿Cuál de las siguientes fuentes de calor es la más consistente con este objetivo?: *a*) potencia alta, *b*) densidad de potencia alta, *c*) potencia baja o *d*) densidad de potencia baja.

30.7. La cantidad de calor requerido para fundir un volumen determinado de metal depende mucho de ¿cuál de las siguientes propiedades? (las tres mejores respuestas): *a*) coeficiente de expansión térmica, *b*) calor de fusión, *c*) temperatura de fusión, *d*) módulo de elasticidad, *e*) calor específico, *f*) conductividad térmica y *g*) difusividad térmica.

30.8. El factor de transferencia de calor en soldadura se define correctamente mediante ¿cuál de las siguientes descripciones?: *a*) la proporción de calor recibido en la superficie de trabajo que se usa para la fusión, *b*) la proporción del calor total generado en la fuente que se recibe en la superficie de trabajo, *c*) la proporción del calor total generado en la fuente que se usa para la fusión o *d*) la proporción del calor total generado en la fuente que se usa para la soldadura.

30.9. El factor de fusión en la soldadura se define correctamente mediante ¿cuál de las siguientes descripciones?: *a*) la proporción de calor recibido en la superficie de trabajo que se usa para la fusión, *b*) la proporción del calor total generado en la fuente que se recibe en la superficie de trabajo, *c*) la proporción del calor total generado en la fuente que se usa para la fusión o *d*) la proporción del calor total generado en la fuente que se usa para la soldadura.

30.10. En una soldadura siempre ocurren fallas en la zona de fusión de la unión soldada, puesto que ésta es la parte de la unión que se ha fundido: *a*) verdadero o *b*) falso.

PROBLEMAS

Diseño de uniones

30.1. Elabore diagramas que muestren cómo se prepararían y alinearían entre sí los bordes de las piezas y también muestre la sección transversal de la soldadura para los siguientes procesos: *a*) soldadura cuadrada con surco, en ambos lados, para una soldadura empalmada y *b*) soldadura con filete único para una unión superpuesta.

30.2. Elabore diagramas que muestren cómo se prepararían y alinearían entre sí los bordes de las piezas y también muestre la sección transversal de la soldadura para los siguientes procesos: *a*) soldadura de filete único para una unión en te; y *b*) soldadura con surco en U doble para una soldadura empalmada.

Densidad de potencia

30.3. Una fuente de calor puede transferir 3 500 J/s a la superficie de una pieza metálica. El área calentada es circular y la intensidad calorífica disminuye conforme aumenta el radio, de la siguiente manera: 70% del calor se concentra en un área circular con un diámetro de 3.75 mm. ¿Es suficiente la densidad de potencia resultante para fundir el metal?

30.4. En un proceso de soldadura con rayo láser, ¿cuál es la cantidad de calor por unidad de tiempo (J/s) que se transfiere al material si el calor se concentra en un círculo con un diámetro de 0.2 mm? Suponga la densidad de potencia que se proporciona en la tabla 30.1.

30.5. Una fuente de calor para soldadura es capaz de transferir 150 Btu/min a la superficie de una pieza metálica. El área calentada es aproximadamente circular y la intensidad calorífica disminuye conforme aumenta el radio, de la siguiente manera: 50% de la potencia se transfiere dentro de un círculo de 0.1 in de diámetro y 75% se transfiere dentro de un círculo concéntrico de 0.25 in de diámetro. ¿Cuál es la densidad de potencia en: *a*) el círculo interno de 0.1 in de diámetro y *b*) el anillo de 0.25 in de diámetro que se encuentra alrededor del círculo interno?, *c*) ¿son suficientes estas densidades de potencia para fundir el metal?

Energía de fusión unitaria

30.6. Calcule la energía unitaria para la fusión de los siguientes metales: *a*) aluminio y *b*) acero al simple bajo carbono.

30.7. Calcule la energía unitaria para la fusión de los siguientes metales: *a*) cobre y *b*) titanio.

30.8. Realice los cálculos y grafique sobre ejes con escalas lineales la relación para la energía de fusión unitaria como una función de la temperatura. Utilice temperaturas como las siguientes para construir la gráfica: 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1 000 °C, 1 200 °C, 1 400 °C, 1 600 °C, 1 800 °C y 2 000 °C. En la gráfica, marque las posiciones de algunos de los metales para soldadura de la tabla 30.2.

30.9. Realice los cálculos y grafique sobre ejes con escalas lineales la relación para la energía de fusión unitaria como una función de la temperatura. Utilice temperaturas como las siguientes para construir la gráfica: 500 °F, 1 000 °F, 1 500 °F, 2 000 °F, 2 500 °F, 3 000 °F y 3 500 °F. En la gráfica, marque las posiciones de algunos de los metales para soldadura de la tabla 30.2.

30.10. Una soldadura de filete tiene un área de sección transversal de 25.0 mm^2 y una longitud de 300 mm. *a*) ¿Que cantidad de calor (en joules) se requiere para lograr la soldadura si el metal que se va a soldar es acero al bajo carbono? *b*) ¿Cuánto calor debe generarse en la fuente de soldadura si el factor de transferencia de calor es de 0.75 y el factor de fusión de 0.63?

30.11. Una soldadura con surco en U se usa para soldar en forma empalmada 2 piezas de placa de titanio con un espesor de 7.0 mm. El surco en U se prepara con un cortador de fresa de manera que el radio del surco es de 3.0 mm. Durante el proceso, la penetración de la soldadura ocasiona un material

adicional de 1.5 mm que debe fundirse. El área de sección transversal final puede aproximarse mediante un semicírculo con un radio de 4.5 mm. La longitud de la soldadura es de 200 mm. El factor de fusión de la instalación es de 0.57 y el factor de transferencia de calor es de 0.86. *a*) ¿Qué cantidad de calor (en joules) se requiere para fundir el volumen de metal en esta soldadura? *b*) ¿Cuál es el calor requerido que se genera en la fuente de soldadura?

30.12. Una soldadura de surco tiene un área de sección transversal = 0.045 in^2 y una longitud de 10 in. *a*) ¿Qué cantidad de calor (en Btu) se requiere para lograr la soldadura si el metal que se va a soldar es acero al medio carbono? *b*) ¿Cuánto calor debe generarse en la fuente de soldadura si el factor de transferencia de calor es de 0.9 y el factor de fusión de 0.7?

30.13. Resuelva el problema anterior, pero ahora considere que el metal que se va a soldar es el aluminio y el factor de fusión correspondiente es la mitad del valor para el acero.

30.14. En un experimento controlado, se requieren 3 700 J para fundir la cantidad de metal que se encuentra en una gota de soldadura con un área de sección transversal de 6.0 mm^2 y una longitud de 150.0 mm. *a*) Utilice la tabla 30.2 para determinar cuál es el material más probable. *b*) Si el factor de transferencia de calor es de 0.85 y el factor de fusión es de 0.55, para un proceso de soldadura ¿cuánto calor debe generarse en la fuente para poder lograr la soldadura?

30.15. Calcule la energía de fusión unitaria para *a*) el aluminio y *b*) el acero, como la suma de: 1) el calor requerido para elevar la temperatura del metal desde la temperatura ambiente a su punto de fusión, lo cual es el producto del calor específico volumétrico y el aumento de temperatura; y 2) el calor de fusión, de manera que su valor pueda compararse con la energía unitaria de fusión calculada mediante la ecuación (30.2). Use unidades de uso común en Estados Unidos o del Sistema Internacional. Encuentre los valores de las propiedades necesarias en estos cálculos ya sea en este texto u en otras referencias. ¿Están los valores lo suficientemente cerca para validar la ecuación (30.2)?

Balance de energía en la soldadura

30.16. La potencia generada en cierta operación de soldadura con arco es de 3000 W. Ésta se transfiere a la superficie de trabajo con un factor de transferencia de calor de 0.9. El metal que se va a soldar es cobre, cuyo punto de fusión se proporciona en la tabla 30.2. Suponga que el factor de fusión es de 0.25. Se realizará una soldadura de filete continua con un área de sección transversal de 15.0 mm^2. Determine la velocidad de viaje a la cual se llevará a cabo la operación de soldadura.

30.17. Resuelva el problema anterior, pero ahora considere que el metal que se va a soldar es acero al alto carbono, el área de sección transversal de la soldadura de 25.0 mm^2 y el factor de fusión es de 0.6.

30.18. Se realiza cierta operación de soldadura con surco sobre una aleación de aluminio. El área de sección transversal de la soldadura es de 30.0 mm^2. La velocidad de soldadura es de 4.00 mm/s. El factor de transferencia de calor es de 0.92 y el factor de fusión es de 0.48. La temperatura de fusión de la aleación de aluminio es de 650 °C. Determine la velocidad de generación de calor requerida en la fuente de soldadura para realizar esta operación.

30.19. La fuente de potencia en una operación de soldadura particular genera 125 Btu/min, que se transfiere a la superficie de trabajo con un factor de transferencia de calor de 0.8. El punto de fusión para el metal que se va a soldar es de 1800 °F y su factor de fusión de 0.5. Se realizará una soldadura de filete continua con un área de sección transversal de 0.04 in^2. Determine el nivel de velocidad de viaje en la que puede conseguirse la operación de soldadura.

30.20. En cierta operación para hacer una soldadura de filete, el área de sección transversal es de 0.025 in^2 y la velocidad de viaje es de 15 in/min. Si el factor de transferencia de calor es de 0.95 y el factor de fusión es 0.5, y el punto de fusión es de 2 000 °F para el metal que se va a soldar, determine la velocidad de generación de calor requerida en la fuente para lograr esta soldadura.

30.21. Se usa una soldadura de filete para unir dos placas de acero al medio carbono, cada una con un espesor de 5.0 mm. Las placas se unen en un ángulo de 90° usando una unión de esquina con filete interno. La velocidad de la cabeza de soldadura es de 6 mm/s. Suponga que la sección transversal de la gota de soldadura se aproxima a un triángulo isósceles rectángulo con una longitud de 4.5 mm, el factor de transferencia de calor es de 0.80 y el factor de fusión es de 0.58. Determine la tasa de generación de calor requerida en la fuente de soldadura para realizar esta operación.

30.22. Se realizó una soldadura de puntos usando un proceso de soldadura con arco. En la operación se unieron dos placas de aluminio, cada una con un espesor de 1/16 de in. El metal fundido formó una pepita con un diámetro de 1/4 de in. La operación requirió tener encendido el arco durante 4 segundos. Suponga que la pepita final tenía el mismo espesor que las placas de aluminio, que el factor de transferencia de calor era de 0.80 y que el factor de fusión era de 0.50. Determine la tasa de generación de calor que se requirió en la fuente para realizar esta soldadura.

30.23. Se aplicará una soldadura de superficie a una placa rectangular de acero al bajo carbono de 200 mm por 350 mm. El metal que se aplicará es de un grado de acero más duro (una aleación), cuyo punto de fusión se supone que es el mismo. Se agregará un espesor de 2.0 mm a la placa, pero con la penetración en el metal base, el espesor total fundido durante la soldadura es igual a 6.0 mm, en promedio. Se aplicará a la superficie haciendo una serie de gotas de soldadura paralelas sobrepuestas que corren a lo largo de la placa. La operación se realizará en forma automática con las gotas dispersas en una operación continua larga a una velocidad de viaje de 7.0 mm/s, usando pases de soldadura separados por 5 mm. Suponga que la gota de soldadura es rectangular con una sección transversal de 5 mm por 6 mm. No tome en cuenta las complicaciones menores de los cambios de dirección en los extremos de la placa. Si se supone que el factor de transferencia de calor es de 0.8 y el factor de fusión de 0.6, determine *a*) la tasa de generación de calor necesaria en la fuente de soldadura y *b*) el tiempo que se requerirá para terminar la operación superficial.

30.24. La superficie del cojinete de un eje hecho de acero al alto carbono se ha desgastado más allá de su vida útil. Cuando era nuevo, su diámetro era de 4.00 in. Para restaurarlo, el diámetro se torneó hasta 3.90 in, para proporcionar una superficie uniforme. Después, el eje se construyó de manera que su tamaño aumentó por la deposición de una capa superficial de soldadura, la cual se depositó con un patrón en espiral usando una sola pasada sobre un torno. Después de la capa de soldadura, el eje se torneó de nuevo para alcanzar su diámetro original de 4.00 in. El metal de soldadura depositado tenía una composición similar al acero del eje. La longitud de la superficie del cojinete era de 7.0 in. Durante la operación de soldadura, el aparato de soldadura se unió al portaherramientas, el cual se alimentó a través de la cabeza del torno conforme el eje rotaba. El eje giró a una velocidad de 4.0 rev/min. La altura de la gota de soldadura era de 3/32 de in por encima de la superficie original. Además, la gota de soldadura penetró 1/16 de in dentro de la superficie del eje. La anchura de la gota de soldadura era de 0.25 in, por lo que la alimentación en el torno se fijó en 0.25 in/rev. Si se supone que la transferencia de calor era de 0.80 y el factor de fusión era de 0.65, determine *a*) la velocidad relativa entre la pieza de trabajo y la cabeza de soldadura, *b*) la velocidad de generación de calor en la fuente de soldadura y *c*) cuánto tiempo se requirió para terminar la actividad de soldadura dentro de esta operación.

31 PROCESOS DE SOLDADURA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los procesos de soldadura se dividen en dos categorías principales: 1) ***soldadura por fusión*** en la cual se logra una coalescencia al fundirse las dos superficies que se van a unir, en algunos casos añadiendo un metal de relleno a la unión; y 2) ***soldadura de estado sólido***, en la cual se usa calor o presión para obtener la coalescencia, pero los metales base no se funden y no se agrega un metal de relleno.

La soldadura por fusión es por mucho la categoría más importante. Incluye 1) la soldadura con arco, 2) la soldadura por resistencia, 3) la soldadura con oxígeno y gas combustible y 4) otros procesos de soldadura por fusión, es decir, aquellos que no pueden clasificarse en alguno de los primeros tres tipos. Los procesos de soldadura por fusión se

analizan en las primeras cuatro secciones de este capítulo. En la sección 31.5 se cubren las operaciones de soldadura de estado sólido, y en las tres secciones finales del capítulo se examinan temas relacionados con todas las operaciones de soldadura: calidad de la soldadura, soldabilidad y diseño para soldadura.

31.1 SOLDADURA CON ARCO

La ***soldadura con arco eléctrico*** (AW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura por fusión en el cual la coalescencia de los metales se obtiene mediante el calor de un arco eléctrico entre un electrodo y el trabajo. Se usa el mismo proceso básico en el corte con arco eléctrico (sección 26.3.4). En la figura 31.1 se muestra un proceso genérico de AW. Un arco eléctrico es una descarga de corriente eléctrica a través de una separación en un circuito. Se sustenta por la presencia de una columna de gas térmicamente ionizada (llamada plasma) a través de la cual fluye la corriente. Para iniciar el arco en un proceso de AW, se acerca el electrodo a la pieza de trabajo; después del contacto el electrodo se separa rápidamente de la pieza a una distancia corta. La energía eléctrica del arco así formado produce temperaturas de 5 500 °C (10 000 °F) o mayores, que son lo suficientemente calientes para fundir cualquier metal. Se forma un pozo de metal fundido, que consiste en el (los) metal(es) base y metal de relleno (si se usa alguno), cerca de la punta del electrodo. En la mayoría de los procesos de soldadura con arco, se agrega un metal de relleno durante la operación para aumentar el volumen y fortalecer la unión soldada. Conforme el electrodo se mueve a lo largo de la unión, el pozo de metal fundido se solidifica de inmediato.

El movimiento que dirige al electrodo hacia el trabajo se consigue ya sea mediante un soldador humano (soldadura manual) o por medios mecánicos (es decir, soldadura con máquina, soldadura automática o soldadura robótica). Uno de los aspectos problemáticos de la soldadura manual con arco es que la calidad de la unión soldada depende de la habilidad y ética de trabajo del soldador. La productividad también es un aspecto a considerar. Con frecuencia, la productividad se mide como ***tiempo de arco*** (también llamado ***tiempo con el arco encendido***), es decir, la proporción de las horas trabajadas en las que se obtiene una soldadura con arco:

$$\text{Tiempo de arco} = (\text{tiempo que el arco está encendido})/(\text{horas trabajadas}) \quad (31.1)$$

Esta definición de productividad puede aplicarse a un soldador individual o a una estación de trabajo mecanizada. Para la soldadura manual, el tiempo de arco es generalmente de alrededor de 20%. Se requiere de periodos de descanso frecuentes para que el soldador venza la fatiga en la soldadura manual con arco, donde existen condiciones de tensión en la

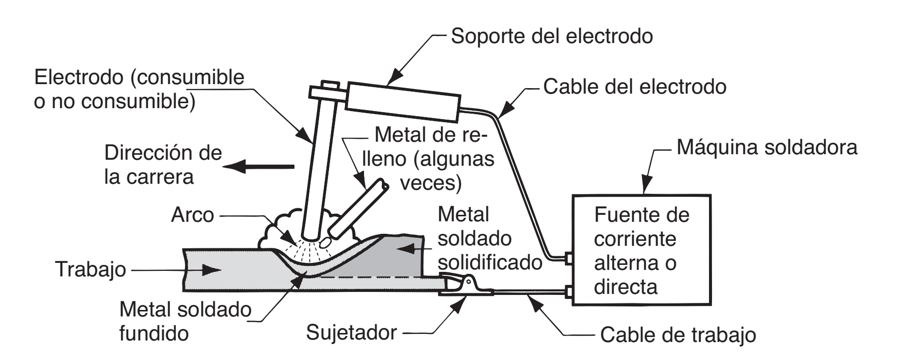


FIGURA 31.1 Configuración básica y circuito eléctrico de un proceso de soldadura con arco.

coordinación manual-visual. El tiempo de arco aumenta alrededor de 50% (más o menos, dependiendo de la operación) para la soldadura con máquina, automática y robótica.

31.1.1 Tecnología general de la soldadura con arco

Antes de describir los procesos individuales de AW eléctrico, resulta conveniente examinar algunos de los aspectos técnicos generales que se aplican a estos procesos.

Electrodos Los electrodos que se usan en los procesos de AW se clasifican como consumibles y no consumibles. Los ***electrodos consumibles*** proporcionan el metal de relleno en la soldadura con arco. Estos electrodos están disponibles en dos formas principales: varillas (también llamados bastones) y alambres. Las varillas para soldadura normalmente tienen una longitud de 225 a 450 mm (9 a 18 in) y un diámetro de 9.5 mm (3/8 in) o menos. El problema con las varillas de soldadura consumibles, al menos en las operaciones de soldadura en producción, es que deben cambiarse de manera periódica, lo que reduce el tiempo de arco del soldador. El alambre para soldadura consumible tiene la ventaja de que puede alimentarse en forma continua al pozo soldado desde rollos que contienen alambre en grandes cantidades; con esto se evitan las interrupciones frecuentes que ocurren cuando se usan las varillas para soldar. Tanto en forma de varilla como de alambre el arco consume al electrodo durante el proceso de soldadura y éste se añade a la unión soldada como metal de relleno.

Los ***electrodos no consumibles*** están hechos de tungsteno (o en raras ocasiones de carbono), los cuales resisten la fusión mediante el arco. A pesar de su nombre, un electrodo no consumible se desgasta en forma gradual durante el proceso de soldadura (la vaporización es el mecanismo principal) y ocurre en forma similar al desgaste gradual de una herramienta de corte en una operación de maquinado. Para los procesos de AW que utilizan electrodos no consumibles, cualquier metal de relleno usado en la operación debe proporcionarse mediante un alambre separado que se alimenta dentro del pozo soldado.

Protección del arco eléctrico En la soldadura con arco, las altas temperaturas provocan que los metales que se unen reaccionen intensamente al oxígeno, nitrógeno e hidrógeno del aire. Las propiedades mecánicas de la unión soldada pueden degradarse seriamente por estas reacciones. A fin de proteger la operación de soldadura de este resultado no deseado, casi todos los procesos de AW proporcionan algún medio para proteger el arco del aire circundante. Esto se logra al cubrir la punta del electrodo, el arco y el pozo de soldadura fundida con un manto de gas o fundente o ambos, lo que inhibe la exposición del metal soldado al aire.

Los gases de protección comunes incluyen el argón y el helio, pues ambos son inertes. En la soldadura de metales ferrosos con ciertos procesos de AW se usa oxígeno y dióxido de carbono, por lo general en combinación con Ar o He, para producir una atmósfera oxidante o para controlar la forma de la soldadura.

Un ***fundente*** es una sustancia usada para evitar la formación de óxidos y otros contaminantes no deseados o para disolverlos y facilitar su remoción. Durante la soldadura, el fundente se derrite y se convierte en una escoria líquida que cubre la operación y protege el metal de soldadura fundido. La escoria se endurece después del enfriamiento y debe removerse con cincel o cepillo. Por lo general, un fundente está formulado para cumplir con varias funciones adicionales que incluyen: 1) proporcionar una atmósfera protectora para la soldadura, 2) estabilizar el arco y 3) reducir las salpicaduras.

El método de aplicación del fundente es diferente para cada proceso. Entre las técnicas de adición se encuentran: 1) vaciar fundente granular en la operación de soldadura, 2) usar un electrodo de varilla cubierto con material fundente, en el cual el recubrimiento se derrite durante la soldadura para cubrir la operación y 3) usar electrodos tubulares que contienen fundente en el núcleo, el cual se libera conforme se consume el electrodo. Estas técnicas se analizan con mayor profundidad en las descripciones particulares de los procesos de AW.

TABLA 31.1 Factores de transferencia de calor para varios procesos de soldadura con arco.

Proceso de soldadura con arco[a]	Factor de transferencia de calor típico, f_1
Soldadura con arco de metal protegido	0.9
Soldadura con arco de metal y gas	0.9
Soldadura con arco de núcleo fundente	0.9
Soldadura con arco sumergido	0.95
Soldadura con arco de tungsteno y gas	0.7

Recopilado de [5].

[a]Los procesos de soldadura con arco se describen en las secciones 31.1.2 y 31.1.3.

Fuente de potencia en la soldadura con arco En la soldadura con arco se usa tanto la corriente directa (CD) como la corriente alterna (CA). Las máquinas de CA son menos costosas al comprarlas y operarlas, pero por lo general están limitadas a la soldadura de metales ferrosos. El equipo de CD puede usarse en todos los metales con buenos resultados y generalmente destaca por un mejor control del arco.

En todos los procesos de soldadura con arco eléctrico, la potencia necesaria para realizar la operación es el producto de la corriente I que pasa por el arco y el voltaje E a través del mismo. Esta potencia se convierte en calor, pero no todo el calor se transfiere a la superficie de trabajo. La convección, la conducción, la radiación y las salpicaduras representan pérdidas que reducen la cantidad de calor utilizable. El efecto de las pérdidas se expresa mediante el factor de transferencia de calor f_1 (sección 28.3). Algunos valores representativos de f_1 para varios procesos de AW se proporcionan en la tabla 31.1. El factor de transferencia de calor es mayor para los procesos de AW que usan electrodos consumibles, debido a que la mayoría del calor consumido para fundir el electrodo se transfiere subsecuentemente al trabajo como metal fundido. El proceso con el valor f_1 más bajo en la tabla 31.1 es la soldadura con arco de tungsteno y gas, que usa un electrodo no consumible. El factor de fusión f_2 (sección 30.3) reduce más el calor disponible para la soldadura. El equilibrio de potencia resultante en la soldadura con arco se define mediante

$$R_{Hw} = f_1 f_2 IE = U_m A_w v \tag{31.2}$$

donde E = voltaje, V; I = corriente, A; y los otros términos se definen igual que en la sección 30.3. Las unidades de R_{Hw} son watts (corriente multiplicada por voltaje), que son iguales a joules/s. Esto puede convertirse a Btu/s si se recuerda que 1 Btu = 1 055 joules.

EJEMPLO 31.1 Potencia en la soldadura con arco

Una operación de soldadura con arco de tungsteno y gas se realiza con una corriente de 300 A y un voltaje de 20 V. El factor de fusión $f_2 = 0.5$ y la energía de fusión unitaria para el metal $U_m = 10$ J/mm^3. Determine *a*) la potencia en la operación, *b*) la tasa de generación de calor en la soldadura y *c*) el flujo volumétrico de metal fundido.

Solución: *a*) La potencia en esta operación de soldadura con arco es

$$P = IE = (300 \text{ A})(20 \text{ V}) = 6000 \text{ W}$$

b) De la tabla 31.1, el factor de transferencia de calor $f_1 = 0.7$. La tasa del calor usada para la soldadura está dada por

$$R_{Hw} = f_1 f_2 IE = (0.7)(0.5)(6\,000) = 2\,100 \text{ W} = 2\,100 \text{ J/s}$$

c) El flujo volumétrico del metal fundido es

$$R_{VW} = (2100 \text{ J/s})(10 \text{ J/mm}^3) = 210 \text{ mm}^3\text{/s}$$

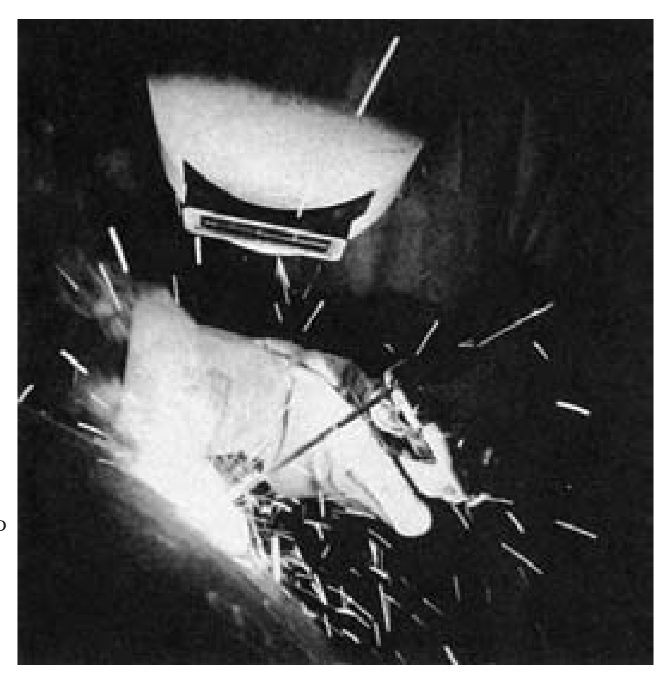


FIGURA 31.2 Soldadura con arco de metal protegido (soldadura de varilla) realizada por un soldador. (Fotografía cortesía de Hobart Brothers Company).

31.1.2 Procesos de AW, electrodos consumibles

En esta sección se analizan varios procesos importantes de soldadura con arco que usan electrodos consumibles. Los símbolos utilizados aquí para los procesos de soldadura son los mismos que emplea la American Welding Society.

Soldadura con arco de metal protegido La *soldadura con arco de metal protegido* (SMAW, por sus siglas en inglés) es un proceso de AW que usa un electrodo consumible y consiste en una varilla de metal de relleno recubierta con materiales químicos que proporcionan un fundente y protección. El proceso se ilustra en las figuras 31.2 y 31.3. La varilla de soldadura (en ocasiones, la SMAW se denomina ***soldadura de varilla***) tiene de manera típica una longitud entre 225 y 450 mm (9 y 18 in) y un diámetro de 2.5 a 9.5 mm (3/32 a 3/8 in). El metal de relleno usado en la varilla debe ser compatible con el metal que se va a soldar y, por lo tanto, la composición debe ser muy parecida a la del metal base. El recubrimiento consiste en celulosa pulverizada (por ejemplo, polvos de algodón y madera) mezclados con óxidos, carbonatos y otros ingredientes integrados mediante un aglutinante de silicato. Algunas veces se incluyen en el recubrimiento polvos metálicos para aumentar la cantidad de metal de relleno y agregar elementos aleantes. El calor del proceso de soldadura funde el recubrimiento y proporciona una atmósfera protectora y escoria para la operación de soldadura. También ayuda a estabilizar el arco y regula la velocidad a la que se funde el electrodo.

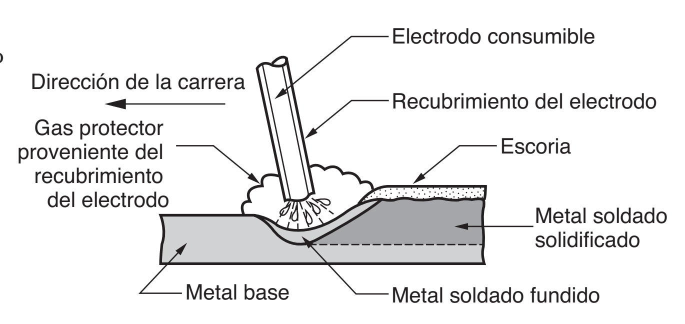


FIGURA 31.3 Soldadura con arco de metal protegido (SMAW).

Durante la operación, el extremo de metal descubierto de la varilla de soldadura (opuesto a la punta con que se suelda) se sujeta en un soporte de electrodos conectado a la fuente de potencia. El soporte tiene una manija aislada para que lo tome y manipule el soldador. Las corrientes que se usan regularmente en la SMAW varían entre 30 y 300 A a voltajes de 15 a 45 V. La selección de los parámetros de potencia adecuados depende de los metales que se van a soldar, del tipo y longitud del electrodo, así como de la profundidad de penetración de la soldadura requerida. El suministro de potencia, los cables de conexión y el soporte del electrodo pueden comprarse por unos cuantos miles de dólares.

Por lo general, la soldadura con arco de metal protegido se realiza en forma manual. Sus aplicaciones comunes incluyen la construcción, instalación de tuberías, estructuras de maquinaria, construcción de embarcaciones, talleres de manufactura y trabajos de reparación. Se prefiere sobre la soldadura con oxígeno y gas combustible para secciones gruesas, por encima de 5 mm (3/16 in), debido a su mayor densidad de potencia. El equipo es portátil y de bajo costo, lo que convierte a la SMAW en el proceso más versátil y de mayor uso entre los procesos de AW. Los metales base incluyen los aceros, los aceros inoxidables, los hierros colados y ciertas aleaciones no ferrosas. No se usa o se emplea rara vez en aluminio y sus aleaciones, al igual que en las aleaciones de cobre y titanio.

Una desventaja de la soldadura con arco de metal protegido como operación de producción es el uso de varillas de electrodos consumibles, porque éstas deben cambiarse en forma periódica a causa del desgaste. Lo anterior reduce el tiempo de arco en este proceso de soldadura. Otra limitación es el nivel de corriente que puede usarse, porque la longitud del electrodo varía durante la operación y ésta afecta el calentamiento de la resistencia del electrodo, los niveles de corriente deben mantenerse dentro de un rango seguro o el recubrimiento se sobrecalentará y fundirá prematuramente cuando se empiece a usar una nueva varilla de soldadura. Algunos de los otros procesos de AW vencen las limitaciones de la longitud de la varilla de soldadura en la SMAW, usando un electrodo de alambre que se alimenta en forma continua.

Soldadura con arco de metal y gas La ***soldadura con arco de metal y gas*** (GMAW, por sus siglas en inglés) es un proceso de AW en el cual el electrodo es un alambre metálico desnudo consumible y la protección se proporciona inundando el arco eléctrico con un gas. El alambre desnudo se alimenta en forma continua y automática desde un rollo a través de la pistola de soldadura, como se ilustra en la figura 31.4. Asimismo, en la figura 31.5 se muestra una pistola de soldadura. En la GMAW se usan diámetros de alambre que van de 0.8 a 6.5 mm (1/32 a 1/4 in); el tamaño depende del espesor de las piezas que se van a unir y de la velocidad de deposición deseada. Los gases usados para protección incluyen gases inertes como el argón y el helio y también gases activos como el dióxido de carbono. La selección de los gases (y mezclas de los mismos) dependen del metal que se va a soldar, así como de otros factores. Se usan gases inertes para soldar aleaciones de aluminio y aceros inoxidables, mientras que comúnmente se usa CO_2 para soldar aceros al bajo y mediano

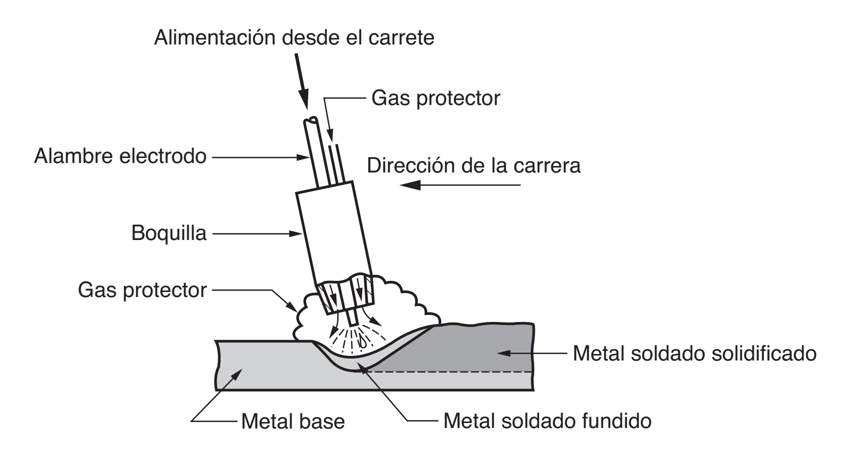


FIGURA 31.4 Soldadura con arco de metal y gas (GMAW).

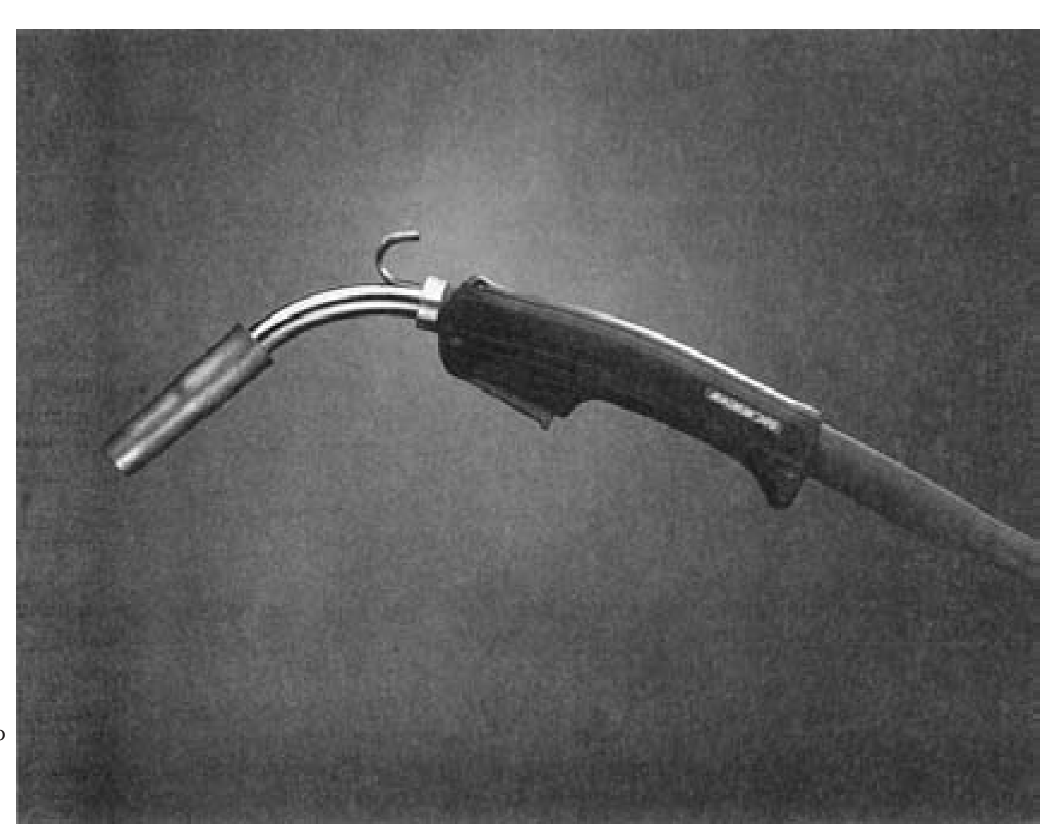


FIGURA 31.5 Pistola para soldadura con arco eléctrico de metal y gas. (Foto cortesía de Lincoln Electric Company).

carbono. La combinación del alambre de electrodo desnudo y los gases protectores eliminan el recubrimiento de escoria en la gota de soldadura y, por ende, evitan la necesidad del esmerilado y limpieza manual de la escoria. Por lo tanto, el proceso de GMAW es ideal para hacer múltiples pasadas de soldadura en la misma unión.

Los diferentes metales en los que se usa la GMAW y las variaciones del proceso han dado origen a diferentes nombres para la soldadura con arco de metal y gas. La primera vez que se introdujo el proceso a fines de la década de 1940, se aplicó a la soldadura de aluminio usando un gas inerte (argón) para protección del arco. Este proceso recibió el nombre de ***soldadura MIG*** (por ***m***etal ***i***nert ***g***as welding, que significa ***soldadura metálica con gas inerte***). Cuando este proceso de soldadura se aplicó al acero, se encontró que los gases inertes eran costosos y se usó CO_2 como sustituto. Entonces, se aplicó el término de ***soldadura con*** CO_2. Algunos refinamientos en la GMAW para el acero condujeron al uso de mezclas de gases, incluidos CO_2 y argón, e incluso oxígeno y argón.

La GMAW se usa ampliamente en operaciones de fabricación para soldar diversos metales ferrosos y no ferrosos. Como usa alambre de soldadura continuo en lugar de varillas de soldadura, tiene una ventaja importante sobre la SMAW en términos de tiempo de arco cuando se realiza en forma manual. Por la misma razón, también se presta a la automatización de la soldadura con arco. Los fragmentos de electrodo que quedan después de la soldadura con varilla también implican desperdicio de metal de relleno, por lo que la utilización del material del electrodo es mayor con la GMAW. Otras características de la GMAW incluyen que no es necesario remover escoria (puesto que no se usa un fundente), velocidades de deposición más altas que en la SMAW y una buena versatilidad.

Soldadura con arco de núcleo fundente Este proceso de soldadura con arco fue desarrollado a principios de la década de 1950 como una adaptación de la soldadura con arco de metal protegido, con el propósito de vencer las limitaciones impuestas por el uso de electrodos de varilla. La ***soldadura con arco de núcleo fundente*** (FCAW, por sus siglas en inglés) es un proceso en el cual el electrodo es un tubo consumible continuo que contiene fundente y otros ingredientes en su núcleo. Tales ingredientes incluyen elementos

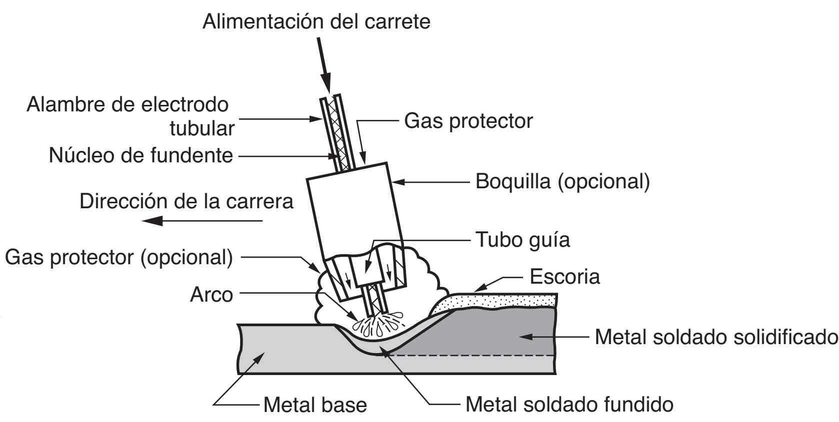


FIGURA 31.6 Soldadura con arco de núcleo fundente. La presencia o ausencia de gas protector incorporado desde el exterior distingue los dos tipos: 1) autoprotegida, en la cual el núcleo proporciona los ingredientes protectores y 2) protegida con gas, en la cual se suministra gases protectores externos.

desoxidantes y aleantes. El "alambre" tubular con núcleo de fundente es flexible y, por ende, puede suministrarse en forma de rollos para que sea alimentado de manera continua a través de la pistola para soldadura con arco. Existen dos versiones de la FCAW: 1) autoprotegida y 2) protegida con gas. En la primera versión de la FCAW, la protección se proporcionaba por medio de un núcleo de fundente; de allí se obtuvo el nombre de ***soldadura con arco de núcleo fundente autoprotegida***. El núcleo en esta forma de FCAW no sólo incluye fundentes, sino también ingredientes que generan gases protectores para el arco. La segunda versión de FCAW, primordialmente para soldar aceros, obtiene la protección del arco mediante gases que se incorporan en forma externa, de manera similar a la soldadura con arco de metal y gas. Esta versión se llama ***soldadura con arco de núcleo fundente protegida por gas***. Debido a que utiliza un electrodo que contiene su propio fundente junto con gases protectores separados, podría considerarse una combinación de la SMAW y la GMAW. Los gases protectores que se emplean de manera típica son el dióxido de carbono para aceros suaves, o mezclas de argón y dióxido de carbono para aceros inoxidables. En la figura 31.6 se ilustra el proceso de FCAW, donde el gas (opcional) sirve para distinguir los dos tipos distintos.

La FCAW tiene ventajas similares a la GMAW, debido a la alimentación continua del electrodo. Se usa primordialmente para soldar aceros y aceros inoxidables en un amplio rango de espesores de materias primas. Es notable su capacidad para producir uniones soldadas de muy alta calidad que son lisas y uniformes.

Soldadura electrogaseosa La ***soldadura electrogaseosa*** (EGW, por sus siglas en inglés) es un proceso de AW que usa un electrodo consumible continuo, ya sea de alambre con núcleo de fundente o alambre desnudo con gases protectores que se suministran en forma externa y zapatas de moldeo para contener el metal fundido. El proceso se aplica primordialmente a la soldadura empalmada vertical, como se muestra en la figura 31.7. Cuando se emplea al alambre de electrodo con núcleo fundente, no se suministran gases externos y el proceso puede considerarse una aplicación especial de la FCAW autoprotegida. Cuando se usa un alambre de electrodo desnudo con gases protectores de una fuente externa, se considera un caso especial de la GMAW. Las zapatas de moldeo se enfrían con agua para evitar su adición al pozo soldado. Junto con los bordes de las piezas que se van a soldar, las zapatas forman un envase muy parecido al de una cavidad moldeada, dentro del cual se agrega de manera gradual el metal fundido del electrodo y las piezas base. El proceso se ejecuta en forma automática, con una cabeza de soldadura móvil que se desplaza en forma vertical hacia arriba para llenar la cavidad en una sola pasada.

Las principales aplicaciones de la soldadura electrogaseosa son los aceros (al bajo y medio carbono, aleaciones bajas y ciertos aceros inoxidables), en la construcción de tanques de almacenamiento grandes y en la construcción de embarcaciones. Los espesores de la materia prima, de 12 a 75 mm (0.5 a 3.0 in), están dentro de la capacidad de la EGW.

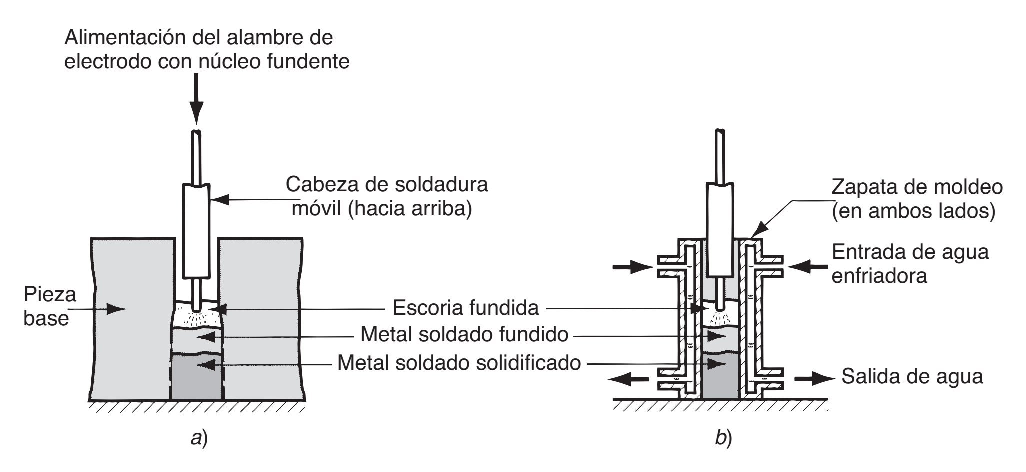


FIGURA 31.7 Soldadura electrogaseosa usando un alambre de electrodo con núcleo fundente: *a*) vista frontal sin zapata de moldeo para mayor claridad y *b*) vista lateral que muestra las zapatas de moldeo en ambos lados.

Además de la soldadura empalmada, también se usa para soldaduras de filete y de surco, siempre en una orientación vertical. En ocasiones deben fabricarse zapatas de moldeo especialmente diseñadas para las formas que se van a unir.

Soldadura con arco sumergido Este proceso, creado durante la década de 1930, fue uno de los primeros de AW que se automatizaron. La ***soldadura con arco sumergido*** (SAW, por sus siglas en inglés) es un proceso que usa un electrodo de alambre desnudo consumible continuo y el arco se protege mediante una cobertura de fundente granular. El alambre del electrodo se alimenta en forma automática desde un rollo hacia dentro del arco. El fundente se introduce a la unión ligeramente adelante del arco de soldadura, por gravedad, desde un tanque alimentador, como se muestra en la figura 31.8. El manto de fundente granular cubre por completo la operación de soldadura con arco, evitando chispas, salpicaduras y radiaciones que son muy peligrosas en otros procesos de AW. Por lo tanto, el operador de la SAW no necesita usar la molesta máscara protectora que se requiere en otras operaciones (pero los anteojos de seguridad y guantes protectores sí son necesarios). La porción de fundente más cercana al arco se derrite y se mezcla con el metal de soldadura fundido para remover impurezas, que después se solidifican en la parte superior de la unión soldada y forman una escoria con aspecto de cristal. La escoria y los granos de fundente no derretidos en la parte superior proporcionan una buena protección de la atmósfera y un buen aislamiento térmico para el área de soldadura, lo que produce un enfriamiento relativamente bajo y una unión soldada de alta calidad, cuyos parámetros de tenacidad y ductilidad son notables. Como se aprecia en el esquema, el fundente no derretido que queda después de la soldadura puede recuperarse y reutilizarse. La escoria sólida que cubre la soldadura debe arrancarse, usualmente por medios manuales.

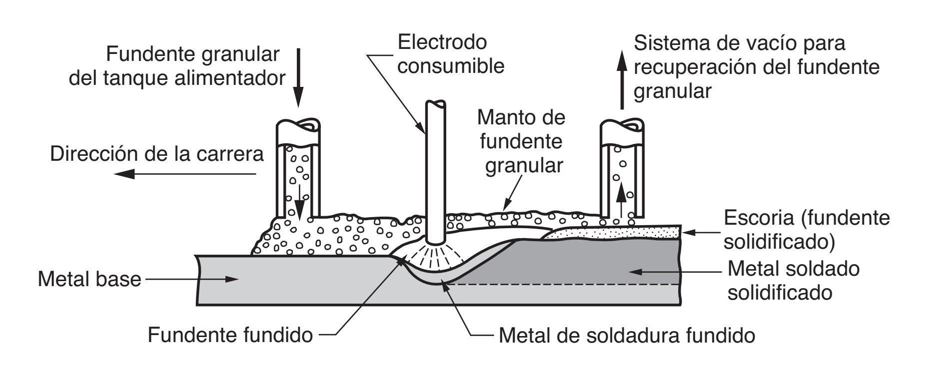


FIGURA 31.8 Soldadura con arco sumergido.

La soldadura con arco sumergido se usa ampliamente en la fabricación de acero para formas estructurales (por ejemplo, vigas en I soldadas); costuras longitudinales y en forma de circunferencia para tubos de diámetro grande, tanques y recipientes de presión; y componentes soldados para maquinaria pesada. En estos tipos de aplicaciones, se sueldan rutinariamente placas de acero con un espesor de 25 mm (1 in) y más pesadas. También pueden soldarse fácilmente con SAW aceros al bajo carbono, aleaciones bajas y aceros inoxidables; pero no aceros al alto carbono, aceros para herramientas y tampoco la mayoría de los metales no ferrosos. Debido a la alimentación mediante gravedad del fundente granular, las piezas siempre deben estar en una orientación horizontal y con frecuencia se requiere una placa de respaldo bajo la unión durante la operación de soldadura.

31.1.3 Procesos de AW, electrodos no consumibles

Todos los procesos AW analizados con anterioridad usan electrodos consumibles. La soldadura con arco de tungsteno y gas, la soldadura con arco de plasma y varios procesos más usan electrodos no consumibles.

Soldadura con arco de tungsteno y gas La ***soldadura con arco de tungsteno y gas*** (GTAW, por sus siglas en inglés) es un proceso que usa un electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte para proteger el arco. Con frecuencia, este proceso se denomina ***soldadura TIG*** (por ***t***ungsten ***i***nert ***g***as welding, que significa soldadura de tungsteno con gas inerte); en Europa se le denomina ***soldadura WIG*** (la W proviene del símbolo químico del tungsteno o wolframio). El proceso de GTAW puede implementarse con o sin un metal de relleno. En la figura 31.9 se ilustra este último caso. Cuando se usa un metal de relleno, éste se agrega al pozo soldado desde una varilla o alambre separado, la cual se funde mediante el calor del arco en lugar de transferirse a través de éste como en un proceso de AW con electrodo consumible. El tungsteno es un buen material para electrodo debido a su alto punto de fusión de 3 410 °C (6 170 °F). Los gases protectores típicos incluyen el argón, el helio o una mezcla de estos gases.

La GTAW es aplicable a casi todos los metales en un amplio rango de espesores para la materia prima. También puede usarse para unir diferentes combinaciones de metales distintos. Sus aplicaciones más comunes incluyen el aluminio y el acero inoxidable. Las aleaciones de hierro, los hierros colados, el plomo y por supuesto el tungsteno son difíciles de soldar mediante la GTAW. En las aplicaciones de soldadura de acero, la GTAW generalmente es más lenta y más costosa que los procesos de AW de electrodo consumible, excepto cuando se incluyen secciones delgadas y cuando se requieren soldaduras de muy alta calidad. Cuando se sueldan hojas delgadas con TIG a tolerancias muy reducidas no se agrega metal de relleno. El proceso puede realizarse de manera manual o mediante métodos de máquina y automatizados para todos los tipos de uniones. Las ventajas de la GTAW en las aplicaciones para las que es adecuada incluyen su alta calidad, que no hay salpicaduras de soldadura debido a que no se transfiere un metal de relleno a través del arco y casi no se requiere limpieza posterior a la soldadura porque no se utiliza fundente.

Soldadura por arco de plasma La ***soldadura por arco de plasma*** (PAW, por sus siglas en inglés) es una forma especial de la soldadura con arco de tungsteno y gas, en la cual un arco

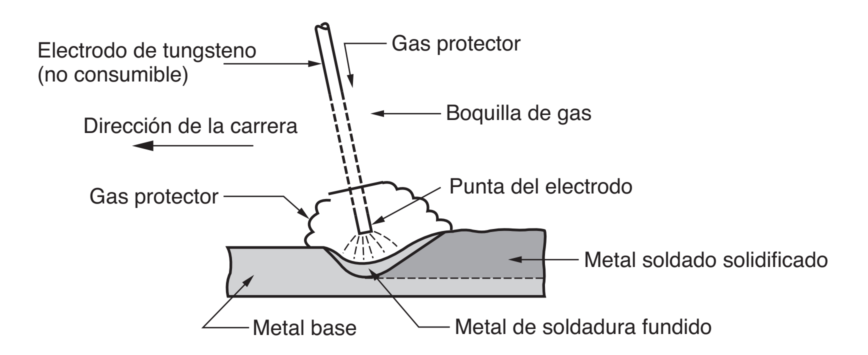


FIGURA 31.9 Soldadura con arco de tungsteno y gas.

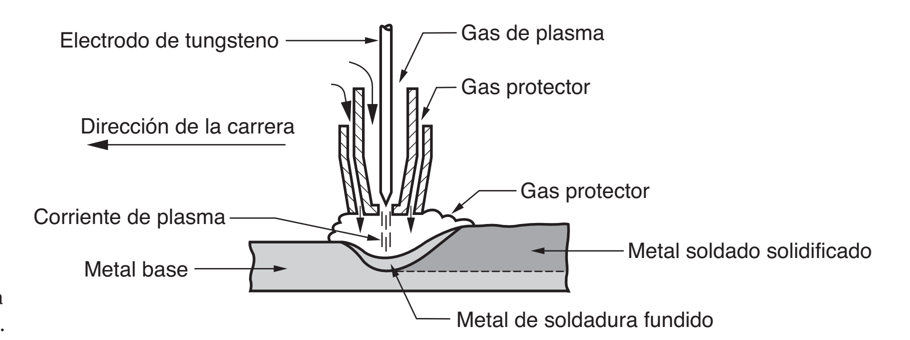


FIGURA 31.10 Soldadura con arco de plasma (PAW).

de plasma controlado se dirige hacia el área de soldadura. En la PAW, se coloca un electrodo de tungsteno dentro de una boquilla especialmente diseñada, la cual enfoca una corriente de gas inerte a alta velocidad (por ejemplo, argón o mezclas de argón e hidrógeno) hacia la región del arco para formar una corriente de arco de plasma intensamente caliente a alta velocidad, como en la figura 31.10. También se usan el argón, el argón-hidrógeno y el helio como gases protectores del arco eléctrico.

Las temperaturas en la soldadura con arco de plasma son de 28 000 °C (50 000 °F) o mayores, y lo suficientemente altas para fundir cualquier metal conocido. La razón de estas altas temperaturas en la PAW (mucho mayores que las de la GTAW) derivan de la estrechez del arco. Aunque los niveles de potencia típicos usados en la PAW son menores que los usados en la GTAW, la potencia se concentra mucho para producir un chorro de plasma de un diámetro pequeño y una densidad de potencia muy alta.

La soldadura con arco de plasma se introdujo alrededor de 1960, pero tardó en difundirse. En años recientes se usa cada vez más como sustituto de la GTAW en aplicaciones como subensambles de automóviles, gabinetes metálicos, marcos para puertas y ventanas y aparatos para el hogar. Debido a las características especiales de la PAW, sus ventajas en estas aplicaciones incluyen una buena estabilidad de arco eléctrico, un control de penetración mejor que en la mayoría de los otros procesos de soldadura con arco eléctrico, altas velocidades de la carrera y una excelente calidad de soldadura. El proceso puede usarse para soldar casi cualquier metal, incluido el tungsteno. Sin embargo, hay metales difíciles de soldar con la PAW, como bronce, hierro colado, plomo y magnesio. Otras limitaciones incluyen el equipo costoso y un tamaño de soplete mayor que para las otras operaciones de AW, lo cual tiende a restringir el acceso en algunas configuraciones de junta.

Otros procesos de soldadura con arco y procesos relacionados Los procesos anteriores de AW son los más importantes comercialmente. Existen varios más, que son casos especiales o variantes de los principales procesos de AW.

La ***soldadura con arco de carbono*** (CAW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura con arco que utiliza un electrodo de carbono (grafito) no consumible. Tiene importancia histórica debido a que fue el primer proceso de soldadura con arco eléctrico en desarrollarse, pero su importancia comercial actual es prácticamente nula. El proceso con arco de carbono se usa como una fuente de calor para soldadura dura y para reparar fundiciones de hierro. También puede usarse en algunas aplicaciones para depositar materiales resistentes al desgaste sobre superficies. Los electrodos de grafito para soldadura han sido sustituidos casi por completo con electrodos de tungsteno (en la GTAW y la PAW).

La ***soldadura de pernos*** (SW, por sus siglas en inglés) es un proceso especializado de AW para unir pernos o componentes similares a piezas básicas. En la figura 31.11 se ilustra una operación típica de SW, en la cual se obtiene protección por medio del uso de una férula cerámica. Para comenzar, el perno se sujeta en una pistola de soldadura especial que controla automáticamente los parámetros de tiempo y potencia de los pasos mostrados en la secuencia. El trabajador sólo debe colocar la pistola en la posición correcta contra la pieza de trabajo base, a la cual se unirá el perno, y después jalar el gatillo. Las aplicaciones de la SW incluyen sujetadores roscados para fijar manijas en utensilios de cocina, aletas de radiación de calor en maquinaria y situaciones de ensamble similares. En operaciones

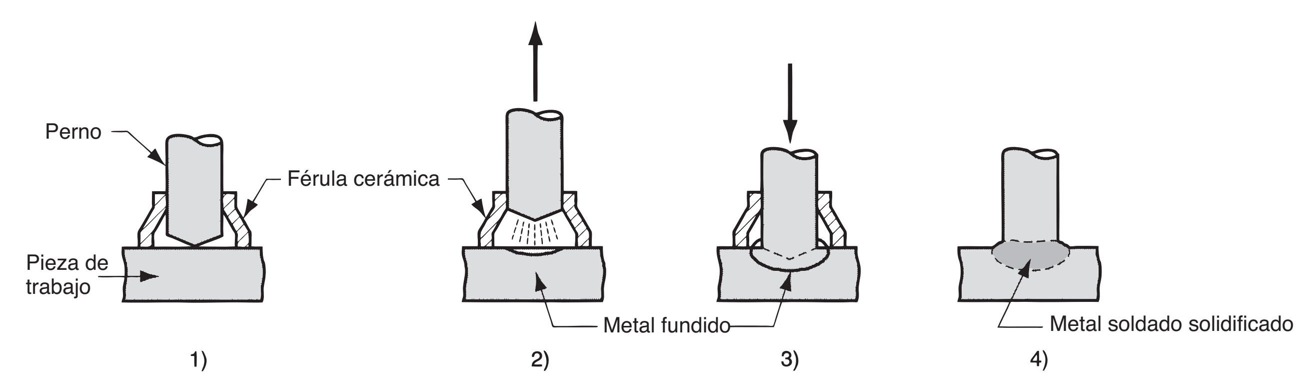


FIGURA 31.11 Soldadura de perno (SW): 1) se coloca el perno; 2) la corriente fluye desde la pistola y se jala el perno desde la base para establecer un arco y crear un pozo fundido; 3) el perno se sumerge en el pozo fundido; y 4) se remueve la férula cerámica después de la solidificación.

de alta producción, la soldadura de pernos generalmente tiene ventajas sobre los remaches, las uniones soldadas con arco en forma manual y los agujeros taladrados y ahusados.

31.2 SOLDADURA POR RESISTENCIA

La ***soldadura por resistencia*** (RW, por sus siglas en inglés) es un grupo de procesos de soldadura por fusión que utiliza una combinación de calor y presión para obtener la coalescencia; el calor se genera mediante una resistencia eléctrica dirigida hacia el flujo de corriente en la unión que se va a soldar. Los principales componentes en la soldadura por resistencia se muestran en la figura 31.12 para una operación de soldadura de puntos por resistencia; éste es el proceso de uso más difundido en el grupo. Los componentes incluyen piezas de trabajo que se van a soldar (por lo general, piezas de lámina metálica), dos electrodos opuestos, un medio para aplicar presión destinado a apretar las piezas entre los electrodos y un suministro de corriente alterna desde el cual se aplica una corriente controlada. La operación produce una zona fundida entre las dos piezas, llamada una ***pepita de soldadura*** en la soldadura de puntos.

A diferencia de la soldadura con arco, la soldadura por resistencia no usa gases protectores, fundentes o metales de relleno; y los electrodos que conducen la energía eléctrica hacia el proceso son no consumibles. La RW se clasifica como un proceso de soldadura por fusión porque el calor aplicado provoca la fusión de las superficies de empalme. Sin embargo, hay excepciones. Algunas operaciones de soldadura basadas en el calentamiento de una resistencia usan temperaturas por debajo del punto de fusión de los metales base, por lo que no ocurre una fusión.

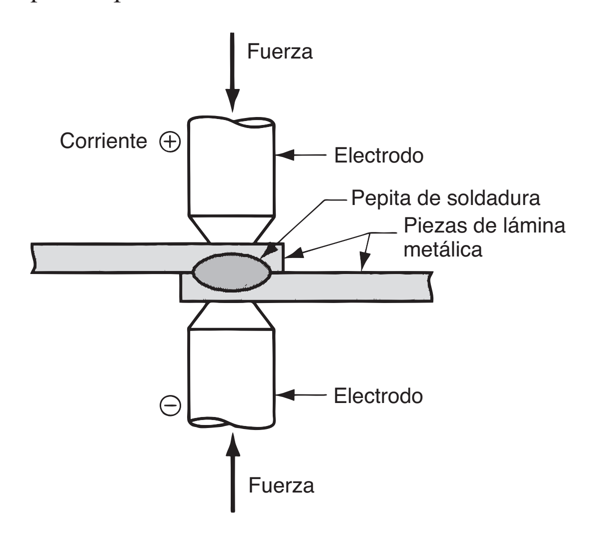


FIGURA 31.12 Soldadura por resistencia; se muestran los componentes en la soldadura de puntos; el proceso predominante en el grupo de RW.

31.2.1 Fuente de potencia en la soldadura por resistencia

La energía calorífica aplicada a la operación de soldadura depende del flujo de corriente, de la resistencia del circuito y del intervalo en que se aplica la corriente. Esto se expresa mediante la ecuación:

$$H = I^2Rt \tag{31.3}$$

donde H = calor generado, J (para convertir a Btu, divida entre 1 055); I = corriente, A; R = resistencia eléctrica, Ω; y t = tiempo, s.

La corriente usada en las operaciones de soldadura por resistencia es muy alta (de manera típica de 5 000 a 20 000 A), aunque el voltaje es relativamente bajo (menos de 10 V de modo usual). La duración t de la corriente es breve en la mayoría de los procesos, tal vez de 0.1 a 0.4 s en una operación de soldadura de puntos típica.

Las razones por las que la corriente es tan alta en la RW son: 1) que el término al cuadrado en la ecuación (31.3) amplifica el efecto de la corriente y 2) que la resistencia es muy baja (alrededor de 0.0001 Ω). La resistencia en el circuito de soldadura es la suma de 1) la resistencia de los electrodos, 2) la resistencia de las piezas de trabajo, 3) las resistencias de contacto entre los electrodos y las piezas de trabajo y 4) la resistencia de contacto de las superficies de empalme. La situación ideal es que las superficies de empalme tengan la resistencia más grande en la suma, dado que ésta es la posición deseada para la soldadura. La resistencia de los electrodos se minimiza usando metales con resistividades muy bajas, como el cobre. La resistencia de las piezas de trabajo es una función de las resistividades de los metales base implicados y los espesores de las piezas. La resistencia de contacto entre los electrodos y las piezas se determina mediante las áreas de contacto (es decir, el tamaño y la forma del electrodo) y la condición de las superficies (por ejemplo, la limpieza de las superficies de trabajo y el óxido en el electrodo). Por último, la resistencia en las superficies de empalme depende del acabado de la superficie, la limpieza, el área de contacto y la presión. No debe existir pintura, grasa, suciedad u otros contaminantes que separen las superficies que hacen contacto.

EJEMPLO 31.2 Soldadura por resistencia

Se ejecuta una operación de soldadura de puntos por resistencia sobre dos piezas de láminas de acero de 1.5 mm de espesor, usando 12 000 amperes para una duración de 0.20 segundos. Los electrodos tienen un diámetro de 6 mm en las superficies que hacen contacto. Se supone que la resistencia es de 0.0001 ohms, y que la pepita de soldadura resultante tiene un diámetro de 6 mm y un espesor de 2.5 mm. La energía de fusión unitaria para el metal es U_m = 12.0 J/mm^3. ¿Qué parte del calor generado se usó para formar la soldadura y qué parte se disipó en el metal circundante?

Solución: El calor generado en la operación está dado en la ecuación (31.3) como:

$$H = (12\,000)^2(0.0001)(0.2) = 2\,880 \text{ J}$$

El volumen de la pepita de soldadura (se supone que tiene forma de disco) es $v = 2.5\dfrac{\pi(6)^2}{4}$ = 70.7 mm^3.

El calor requerido para fundir este volumen de metal es H_m = 70.7(12.0) = 848 J.
El calor restante, 2 880 − 848 = 2 032 J (70.6% del total), se absorbe en el metal circundante.

El éxito en la soldadura por resistencia depende tanto de la presión como del calor. Las principales funciones de la presión en la RW son 1) obligar el contacto entre los electrodos y las piezas de trabajo, así como entre las dos superficies de trabajo antes de aplicar la corriente, y 2) presionar las superficies de empalme una contra otra para obtener una coalescencia cuando se alcance la temperatura adecuada para soldar.

Las ventajas generales de la soldadura por resistencia incluyen que 1) no se requiere un metal de relleno, 2) son posibles altas velocidades de producción, 3) se presta para la mecanización y la automatización, 4) el nivel de habilidad del operador es menor al que se requiere para la soldadura con arco y 5) tiene buena repetitividad y confiabilidad. Las desventajas son que 1) el costo inicial del equipo es alto, por lo general mucho más alto que la mayoría de las operaciones de soldadura con arco, y 2) los tipos de uniones que pueden soldarse se limitan a las uniones sobrepuestas para la mayoría de los procesos de RW.

31.2.2 Procesos de soldadura por resistencia

Los procesos de soldadura por resistencia de mayor importancia comercial son la soldadura de puntos, de costura y por proyección.

Soldadura de puntos por resistencia La soldadura de puntos por resistencia es por mucho el proceso predominante en este grupo. Se usa ampliamente en la producción masiva de automóviles, aparatos domésticos, muebles metálicos y otros productos hechos a partir de láminas metálicas. Si se considera que la carrocería de un automóvil típico tiene aproximadamente 10 000 soldaduras de punto individuales y que la producción anual de automóviles en todo el mundo se mide en decenas de millones de unidades, es posible apreciar la importancia económica de la soldadura de puntos por resistencia.

La ***soldadura de puntos por resistencia*** (RSW, por sus siglas en inglés) es un proceso de RW en el cual se obtiene la fusión en una ubicación de las superficies de empalme de una unión superpuesta, mediante electrodos opuestos. El proceso se usa para unir piezas de láminas metálicas con un espesor de 3 mm (0.125 in) o menos, usando una serie de soldaduras de puntos en situaciones donde no se requiere un ensamble hermético. El tamaño y la forma del punto de soldadura están determinados por la punta de electrodo; la forma de electrodo más común es redonda, pero también se usan formas hexagonales, cuadradas y otras. La pepita de soldadura resultante tiene un diámetro típico de 5 a 10 mm (0.2 a 0.4 in), con una zona afectada por el calor que se extiende un poco más allá de la pepita en los metales base. Si la soldadura se hace correctamente, su resistencia es comparable con la del metal circundante. Los pasos de un ciclo de soldadura de puntos se muestran en la figura 31.13.

Los materiales usados para los electrodos en la RSW consisten en dos grupos principales: 1) aleaciones basadas en cobre y 2) compuestos de metales refractarios, como combinaciones de cobre y tungsteno. El segundo grupo tiene una mayor resistencia al desgaste. Como en la mayoría de los procesos de manufactura, las herramientas para la soldadura de puntos se desgastan gradualmente con el uso. Cuando resulta práctico, los electrodos se diseñan con canales internos para el enfriamiento por agua.

Debido a su extenso uso industrial, están disponibles diversas máquinas y métodos para realizar las operaciones de soldadura de puntos. El equipo incluye máquinas de soldadura de puntos con balancín y tipo prensa, así como pistolas portátiles de soldadura de puntos. Los ***soldadores de punto con balancín***, que se muestran en la figura 31.14, tienen un electrodo inferior estacionario y un electrodo superior móvil que sube y baja para cargar y descargar el trabajo. El electrodo superior se monta en un balancín (de ahí el nombre), cuyo movimiento es controlado mediante un pedal operado por el trabajador. Las máquinas modernas pueden programarse para controlar la fuerza y la corriente durante el ciclo de soldadura.

Los ***soldadores de puntos tipo prensa*** están diseñados para un trabajo más grande. El electrodo superior tiene un movimiento en línea recta proporcionado por una prensa vertical, que se opera en forma neumática o hidráulica. La acción de la prensa permite que se apliquen fuerzas más grandes, y los controles generalmente hacen posible la programación de ciclos de soldadura complejos.

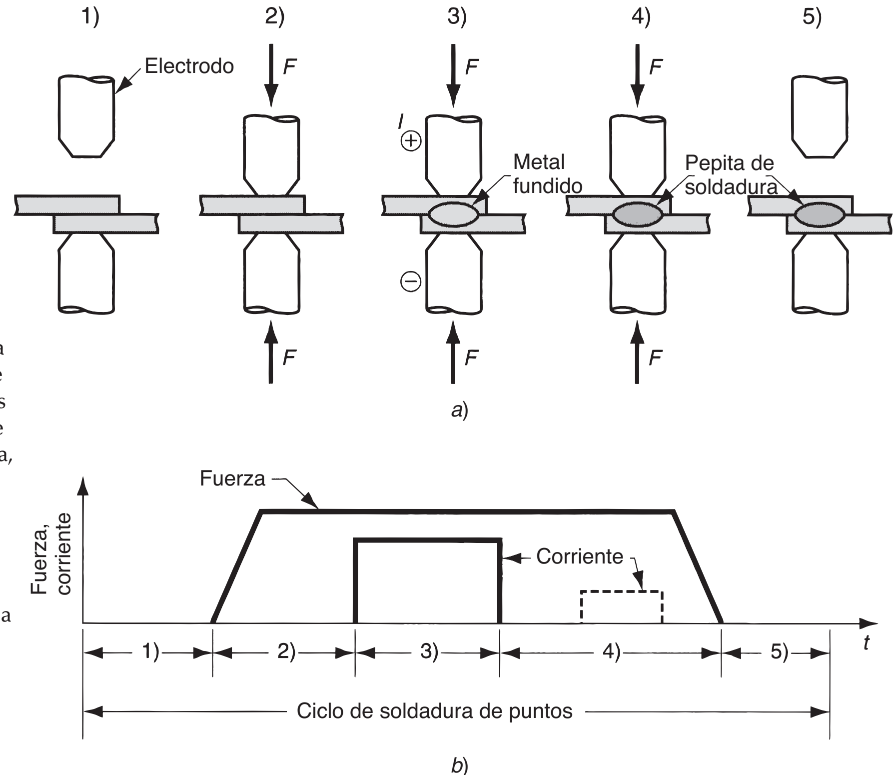


FIGURA 31.13 *a*) Pasos en un ciclo de soldadura de puntos y *b*) gráfica de la fuerza de presión y la corriente durante el ciclo. La secuencia es: 1) las piezas se insertan entre los electrodos abiertos, 2) los electrodos se cierran y se aplica una fuerza, 3) tiempo de soldadura, se activa la corriente, 4) se desactiva la corriente, pero se mantiene o se aumenta la fuerza (en ocasiones se aplica una corriente reducida cerca del final de este paso para liberar la tensión en la región de la soldadura) y 5) se abren los electrodos y se remueve el ensamble soldado.

Los dos tipos de máquinas anteriores son soldadores de puntos estacionarios o estáticos, en los cuales el trabajo se coloca en la máquina. Para trabajos pesados y grandes es difícil mover (y orientar) el trabajo hacia máquinas estacionarias. Para estos casos, existen ***pistolas portátiles de soldadura de puntos*** en diferentes tamaños y configuraciones. Estos dispositivos consisten en dos electrodos opuestos dentro de un mecanismo de pinzas. Cada unidad tiene un peso ligero, por lo que un trabajador o un robot industrial pueden sostenerla y manipularla. La pistola está conectada a su propia fuente de potencia y control mediante cables eléctricos flexibles y mangueras de aire. Si es necesario, también puede proporcionarse enfriamiento de los electrodos mediante una manguera con agua. Las pistolas portátiles para soldadura de puntos se usan ampliamente en las plantas de ensamble final de automóviles para soldar carrocerías de lámina metálica. Algunas de estas pistolas son manejadas por personas, pero los robots industriales se han convertido en la tecnología preferida, como se ilustra en la figura 38.11.

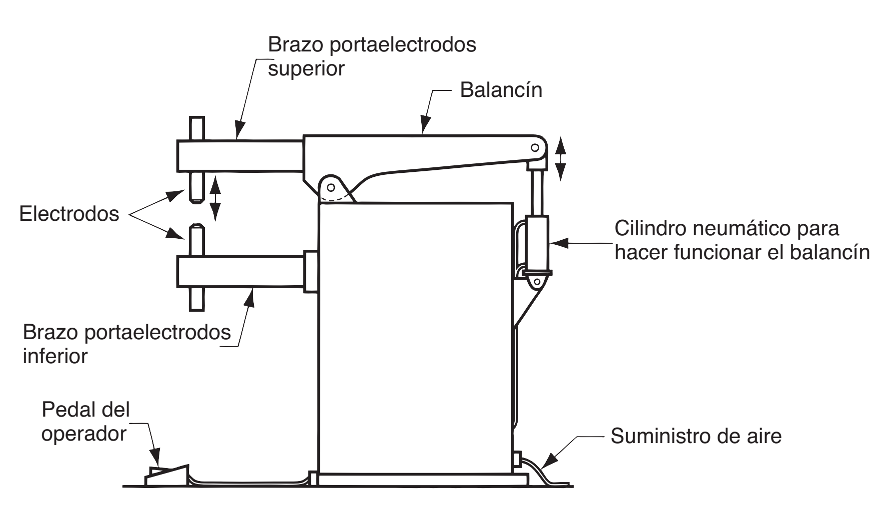


FIGURA 31.14 Máquina de soldadura de puntos con balancín.

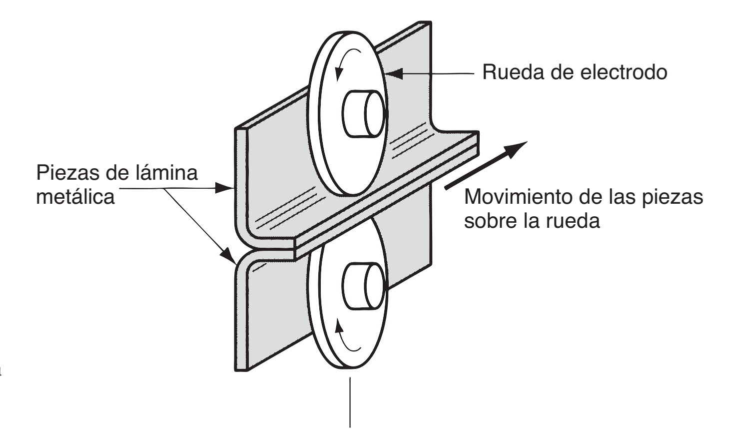


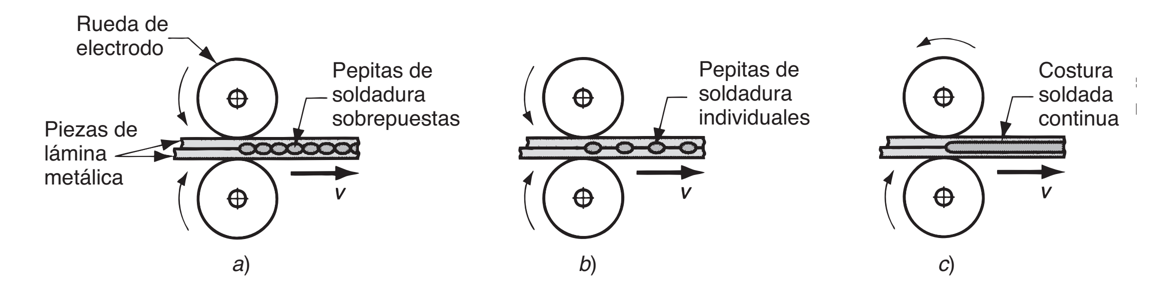
FIGURA 31.15 Soldadura de costura por resistencia (RSEW).

Soldadura de costura por resistencia En la ***soldadura de costura por resistencia*** (RSEW, por sus siglas en inglés), los electrodos con forma de varilla de la soldadura de puntos se sustituyen con ruedas giratorias, como las que se muestran en la figura 31.15, y se hace una serie de soldaduras de puntos sobrepuestas a lo largo de la unión. El proceso produce uniones herméticas y sus aplicaciones industriales incluyen la producción de tanques de gasolina, silenciadores de automóviles y otros contenedores fabricados con láminas de metal. Técnicamente, la RSEW es igual que la soldadura de puntos, excepto porque los electrodos en ruedas ocasionan ciertas complejidades. Como, por lo general, la operación se realiza en forma continua y no discreta, las costuras deben estar a lo largo de una línea recta o uniformemente curva. Las esquinas agudas e irregularidades similares son difíciles de manejar. Asimismo, la combadura de las piezas es el factor más significativo en la soldadura de costura por resistencia; por esta causa se requieren soportes bien diseñados para mantener el trabajo en la posición correcta y así reducir la distorsión.

El espaciamiento entre las pepitas de soldadura en la RSEW depende del movimiento de las ruedas de electrodos relacionado con la aplicación de la corriente de soldadura. En el método usual de operación, llamado ***soldadura de movimiento continuo***, la rueda gira en forma continua a una velocidad constante y la corriente se activa a intervalos que coinciden con el espaciamiento deseado entre los puntos de soldadura a lo largo de la costura. Normalmente, la frecuencia de las descargas de corriente se establece para que se produzcan puntos de soldadura sobrepuestos. Pero si se reduce bastante la frecuencia, habrá espacios entre los puntos de soldadura y este método se denomina ***soldadura de puntos con rodillo***. En otra variación, la corriente de soldadura permanece constante (en lugar de activarse y desactivarse), por lo que se produce una costura soldada verdaderamente continua. Estas variaciones se ilustran en la figura 31.16.

Una alternativa a la soldadura de movimiento continuo es la ***soldadura de movimiento intermitente***, en la cual la rueda de electrodos se detiene en forma periódica para hacer la soldadura de puntos. La cantidad de rotación de la rueda entre las paradas determina la

Figura 31.16 Diferentes tipos de costuras producidas por ruedas de electrodos: *a*) soldadura de costura por resistencia convencional, en la cual se producen puntos sobrepuestos, *b*) soldadura de puntos con rodillo y *c*) soldadura por resistencia continua.



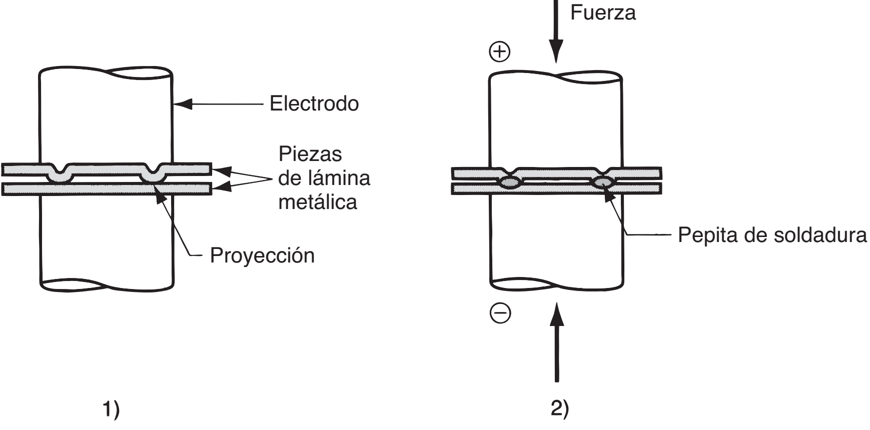


FIGURA 31.17 Soldadura de proyección por resistencia (RPW): 1) al principio de la operación, el contacto entre las piezas está en las proyecciones y 2) cuando se aplica una corriente, se forman pepitas de soldadura similares a las de la soldadura de puntos en las proyecciones.

distancia entre los puntos de soldadura a lo largo de la costura, lo que produce patrones similares a los de los incisos a y b de la figura 31.16.

Las máquinas de soldadura de costura son similares a los soldadores por puntos tipo de prensa, excepto porque se usan ruedas de electrodos, en lugar de los electrodos normales con forma de varilla. Con frecuencia es necesario enfriar el trabajo y las ruedas en la RSEW; esto se consigue al dirigir agua a las partes superior e inferior de las superficies de la parte de trabajo, cerca de las ruedas de electrodos.

Soldadura de proyección por resistencia La ***soldadura de proyección por resistencia*** (RPW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura por resistencia en el cual ocurre la coalescencia en uno o más puntos de contacto relativamente pequeños sobre las piezas. Estos puntos de contacto están determinados por el diseño de las piezas que se van a unir y pueden consistir en proyecciones, grabados o intersecciones localizadas de las piezas. Un caso típico en el que se sueldan dos piezas de lámina metálica se describe en la figura 31.17. La pieza superior se ha fabricado con dos puntos grabados para entrar en contacto con la otra pieza al principio del proceso. Puede argumentarse que la operación de grabado aumenta el costo de la pieza, pero este incremento puede más que compensarse por los ahorros en el costo de la soldadura.

Existen variaciones de la soldadura de proyección por resistencia, dos de las cuales se muestran en la figura 31.18. En una variación, es posible unir permanentemente sujetadores con proyecciones maquinadas o formadas en láminas o placas mediante RPW, lo que facilita las operaciones de ensamble subsecuentes. Otra variación, llamada ***soldadura de alambre transversal***, se usa para fabricar productos de alambre soldado, como rejas, carros para supermercado y parrillas. En este proceso, las superficies de los alambres redondos que hacen contacto funcionan como las proyecciones y permiten ubicar el calor de resistencia para la soldadura.

Otras operaciones de soldadura por resistencia Además de los procesos de soldadura por resistencia principales descritos con anterioridad, deben señalarse varios procesos adicionales en este grupo: instantánea, con recalcado, por percusión y por resistencia de alta frecuencia.

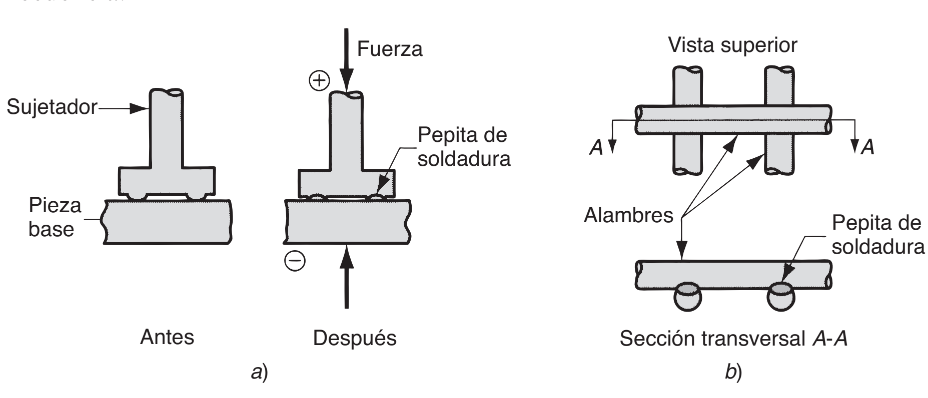


FIGURA 31.18 Dos variaciones de soldadura de proyección por resistencia: *a*) soldadura de un sujetador maquinado o formado sobre una pieza de lámina metálica y *b*) soldadura de alambre transversal.

FIGURA 31.19 Soldadura instantánea (FW): 1) calentamiento mediante resistencia eléctrica y 2) recalcado, las piezas se aprietan una contra otra.

En la ***soldadura instantánea*** (FW, por sus siglas en inglés), que se usa normalmente para uniones empalmadas, se ponen en contacto o se acercan las dos superficies que se van a unir y se aplica una corriente eléctrica para calentar las superficies hasta su punto de fusión, después de lo cual las superficies se oprimen juntas para formar la soldadura. Los dos pasos se detallan en la figura 31.19. Además del calentamiento por resistencia, se generan ciertos arcos (llamados destellos ***instantáneos***, de ahí el nombre del proceso de soldadura) dependiendo del alcance del contacto entre las superficies de empalme, por lo que la soldadura instantánea se clasifica en ocasiones en el grupo de soldadura con arco. Por lo general, la corriente se detiene durante el recalcado. En este proceso, se desborda un poco de metal fuera de la unión, al igual que contaminante sobre las superficies, que después debe maquinarse para proporcionar una unión de tamaño uniforme.

Las aplicaciones de la soldadura instantánea incluyen la soldadura empalmada de tiras de acero en operaciones con laminadoras, la unión de extremos en el estirado de alambres y la soldadura de partes tubulares. Los extremos que se van a unir deben tener las mismas secciones transversales. Para estos tipos de aplicaciones de alta producción, la soldadura instantánea es rápida y económica, pero el equipo es costoso.

La ***soldadura con recalcado*** (UW, por sus siglas en inglés) es similar a la soldadura instantánea, excepto porque en la UW las superficies de empalme se aprietan una contra la otra durante el calentamiento y se recalcan. En la soldadura instantánea, los pasos de calentamiento y presión se separan durante el ciclo. El calentamiento en la UW se obtiene completamente mediante resistencia eléctrica generada en las superficies que hacen contacto; no se producen arcos. Cuando las superficies de empalme se han calentado a una temperatura conveniente por debajo del punto de fusión, se aumenta la fuerza que presiona a las piezas una contra otra para producir el recalcado y la coalescencia en la región de contacto. Por lo tanto, la soldadura con recalcado no es un proceso de soldadura por fusión en el mismo sentido que los otros procesos de soldadura que se han analizado. Las aplicaciones de la UW son similares a las de la soldadura instantánea: unión de extremos de alambres, tuberías, tubos, etcétera.

La ***soldadura por percusión*** (PEW, por sus siglas en inglés) también es similar a la soldadura instantánea, excepto porque la duración del ciclo de soldadura es extremadamente breve; en forma típica sólo transcurren de 1 a 10 milisegundos. El calentamiento rápido se obtiene mediante las rápidas descargas de energía eléctrica entre las dos superficies que se van a unir, para continuar con la percusión inmediata de una pieza contra la otra a fin de formar la soldadura. El calentamiento está muy localizado y esto hace atractivo el proceso para aplicaciones electrónicas, en las cuales las dimensiones son muy pequeñas y los componentes pueden ser muy sensibles al calor.

La ***soldadura por resistencia de alta frecuencia*** (HFRW, por sus siglas en inglés) es un proceso en el cual se usa una corriente alterna de alta frecuencia para el calentamiento, seguido de la aplicación rápida de una fuerza de recalcado para producir coalescencia, como en la figura 31.20a. Las frecuencias están entre 10 y 500 kHz y los electrodos hacen contacto con el trabajo en la vecindad inmediata de la unión soldada. En una variación del proceso, llamada ***soldadura por inducción de alta frecuencia*** (HFIW, por sus siglas en inglés), la corriente de calentamiento se induce en las piezas mediante una bobina de inducción de alta frecuencia, como en la figura 31.20b. La bobina no hace contacto físico

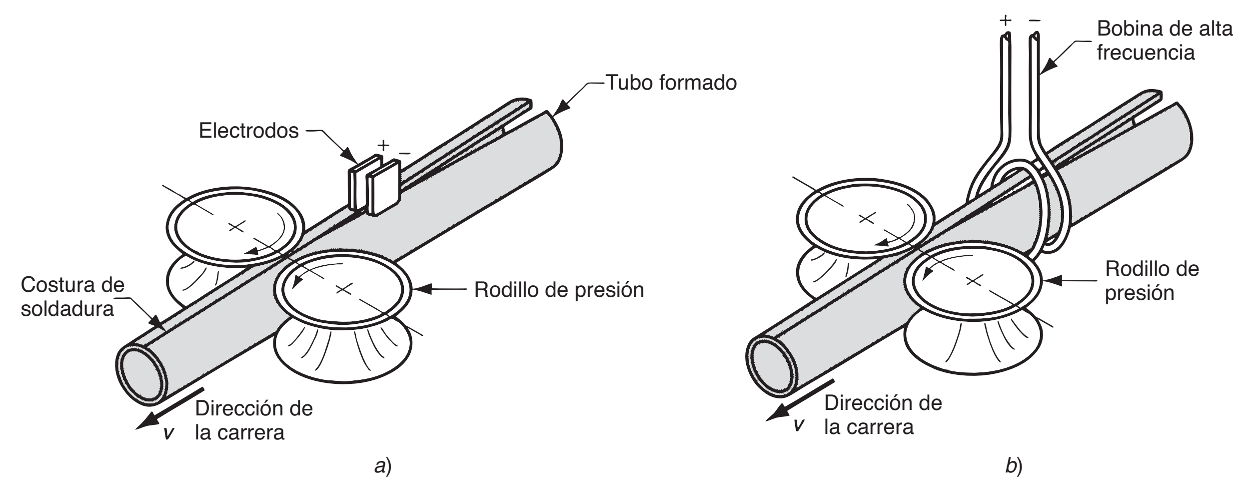


FIGURA 31.20 Soldadura de de tubos con costura, mediante *a*) soldadura por resistencia de alta frecuencia y *b*) soldadura por inducción de alta frecuencia.

con el trabajo. Las aplicaciones principales de la HFRW y de la HFIW son la soldadura empalmada continua de costuras longitudinales en tuberías metálicas.

31.3 SOLDADURA CON OXÍGENO Y GAS COMBUSTIBLE

La ***soldadura con oxígeno y gas combustible*** (OFW, por sus siglas en inglés) es el término que se usa para describir el grupo de operaciones de fusión durante las cuales se queman diferentes combustibles mezclados con oxígeno para ejecutar la soldadura. Los procesos de OFW emplean varios tipos de gases, los cuales representan la principal diferencia entre los integrantes de este grupo. El oxígeno y el gas combustible también se usan normalmente en sopletes de corte para cortar y separar placas metálicas y otras piezas (sección 27.3.5). El proceso más importante de OFW es la soldadura con oxiacetileno.

31.3.1 Soldadura con oxiacetileno

La soldadura con oxiacetileno (OAW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura por fusión realizado mediante una flama de alta temperatura a partir de la combustión del acetileno y el oxígeno. La flama se dirige mediante un soplete de soldadura. En ocasiones se agrega un metal de relleno y a veces se aplica presión entre las superficies de las piezas que hacen contacto. En la figura 31.21 se muestra una operación típica de soldadura con oxiacetileno. Cuando se usa metal de relleno, normalmente está en forma de varillas con diámetros que van de 1.6 a 9.5 mm (1/16 a 3/8 in). La composición del relleno debe ser similar a la de los metales base. Con frecuencia, el relleno se recubre con un ***fundente*** que ayuda a limpiar las superficies y a evitar la oxidación, con lo que se produce una mejor unión soldada.

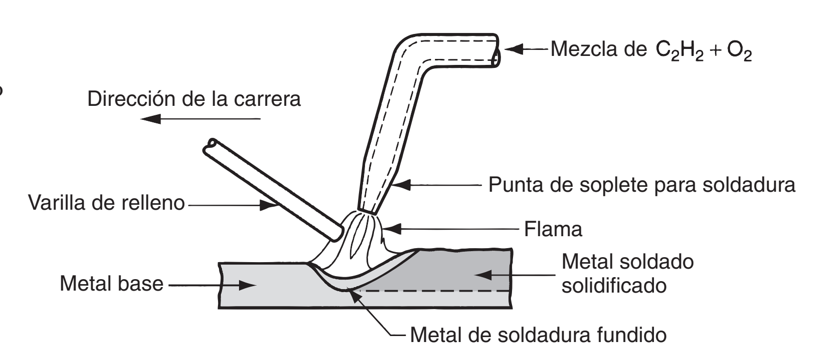


FIGURA 31.21 Una operación típica de soldadura con oxiacetileno (OAW).

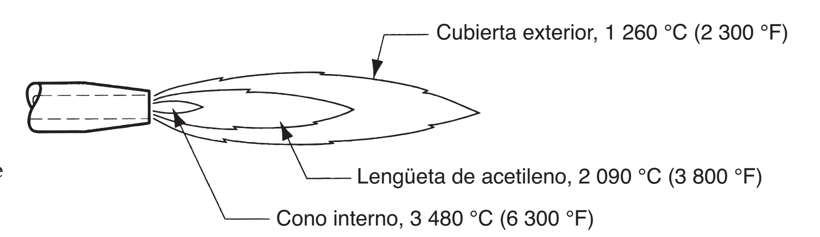


FIGURA 31.22 La flama neutral de un soplete de oxiacetileno; en la figura se indican las temperaturas alcanzadas.

El acetileno (C_2H_2) es el combustible más popular entre el grupo de la OFW porque soporta temperaturas más altas que cualquiera de los otros, hasta de 3 480 °C (6 300 °F). La flama en la OAW se produce mediante la reacción química del acetileno y el oxígeno en dos etapas. La primera etapa se define mediante la reacción

$$C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 + \text{calor} \quad (31.4a)$$

los productos de la cual son ambos combustibles, lo que conduce a la reacción de la segunda etapa

$$2CO + H_2 + 1.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O + \text{calor} \quad (31.4b)$$

Las dos etapas de la combustión son visibles en la flama de oxiacetileno que emite el soplete. Cuando la mezcla de acetileno y oxígeno está en la razón 1:1, como se describe en la ecuación (31.4), la ***flama neutral*** resultante es como se muestra en la figura 31.22. La reacción de la primera etapa se aprecia como el cono interno de la flama (que tiene un color blanco brillante), mientras que la reacción de la segunda etapa se exhibe en la cubierta externa (que casi no tiene color, pero posee matices que van del azul al naranja). La temperatura máxima se alcanza en la punta del cono interno; las temperaturas de la segunda etapa son algo menores que las del cono interno. Durante la soldadura, la cubierta externa se extiende y protege de la atmósfera circundante las superficies de trabajo que se unen.

El calor total liberado durante las dos etapas de la combustión es de 55×10^6 J/m^3 (1470 Btu/ft^3) de acetileno. Sin embargo, debido a la distribución de la temperatura en la flama, la forma en la que ésta se extiende sobre la superficie de trabajo y se pierde en el aire, así como las densidades de potencia y los factores de transferencia de calor en la soldadura con oxiacetileno son relativamente bajos; $f_1 = 0.10$ a 0.30.

EJEMPLO 31.3 Generación de calor en la soldadura con oxiacetileno

Un soplete de oxiacetileno suministra 0.3 m^3 de acetileno por hora y un flujo volumétrico igual de oxígeno para una operación de OAW sobre acero de 4.5 mm de espesor. El calor generado por combustión se transfiere a la superficie de trabajo con un factor $f_1 = 0.20$. Si se concentra 75% del calor de la flama en un área circular sobre la superficie de trabajo que tiene un diámetro de 9.0 mm, encuentre *a*) la tasa de calor liberado durante la combustión, *b*) la tasa de transferencia de calor hacia la superficie de trabajo y *c*) la densidad de potencia promedio en el área circular.

Solución: *a*) La tasa de calor generado por el soplete es el producto del flujo volumétrico del acetileno por el calor de combustión:

$$R_H = (0.3 \text{ m}^3/\text{h})\ (55 \times 10^6 \text{ J/m}^3) = 16.5 \times 10^6 \text{ J/h o } 4\,583 \text{ J/s}$$

b) Con un factor de transferencia de calor $f_1 = 0.20$, la tasa del calor recibido en la superficie de trabajo es

$$f_1 R_H = 0.20(4583) = 917 \text{ J/s}$$

c) El área del círculo en el que se concentra 75% del calor de la flama es

$$A = \frac{\pi(9)^2}{4} = 63.6 \text{ mm}^2$$

La densidad de potencia en el círculo se encuentra al dividir el calor disponible entre el área del círculo:

$$PD = \frac{0.75(917)}{63.6} = 10.8 \text{ W/mm}^2$$ ■

La combinación de acetileno y oxígeno es muy inflamable y, por lo tanto, el ambiente en el que se realiza la OAW es peligroso. Algunos de los peligros se relacionan específicamente con el acetileno. El C_2H_2 puro es un gas inodoro e incoloro. Por razones de seguridad, el acetileno comercial se procesa para que contenga un olor característico de ajo. Una de las limitaciones físicas del gas es su inestabilidad a presiones superiores a 1 atm (0.1 MPa o 15 lb/in^2). Por esta razón, los cilindros de almacenamiento de acetileno se empacan con un material de relleno poroso (como asbesto, madera de balsa y otros materiales) saturado con acetona (CH_3COCH_3). El acetileno se disuelve en acetona líquida; de hecho, la acetona disuelve alrededor de 25 veces su propio volumen en acetileno, lo que proporciona un medio relativamente seguro de almacenar este gas para soldadura. Como una precaución de seguridad adicional en la soldadura con oxiacetileno se incluye protección para los ojos y la piel del soldador (lentes, guantes y ropas de protección). Además, las cuerdas de los tornillos en los cilindros y mangueras de acetileno y oxígeno son estándares, para evitar la conexión accidental de los gases incorrectos. También es fundamental un mantenimiento adecuado del equipo.

El equipo de la OAW es relativamente barato y portátil. Por lo tanto, es un proceso económico y versátil, conveniente para producción en bajas cantidades y trabajos de reparación. Rara vez se usa para soldar materia prima de láminas y placas más gruesas de 6.4 mm (1/4 in) debido a las ventajas de la soldadura con arco en tales aplicaciones. Aunque la OAW puede mecanizarse, con frecuencia se ejecuta en forma manual y, por esta causa, depende de la habilidad del soldador producir una unión soldada de alta calidad.

31.3.2 Gases alternativos para la soldadura con oxígeno y gas combustible

Varios elementos del grupo de la OFW se basan en gases diferentes al acetileno. La mayoría de los combustibles alternativos se enlistan en la tabla 31.2, junto con las temperaturas a las que arden y los calores de combustión. Con propósitos de comparación, se incluye el acetileno en la lista. Aunque el oxiacetileno es el combustible más común para la OFW, todos los otros gases pueden usarse en ciertas aplicaciones, típicamente limitadas a la soldadura de láminas metálicas y metales con bajas temperaturas de fusión y soldadura dura

TABLA 31.2 Gases usados en la soldadura o corte con oxígeno y gas combustible, con temperaturas de flama y calores de combustión.

	Temperatura[a]		Calor de combustión	
Combustible	°C	°F	MJ/m^3	Btu/ft^3
Acetileno (C_2H_2)	3 087	5 589	54.8	1 470
MAPP[b] (C_3H_4)	2 927	5 301	91.7	2 460
Hidrógeno (H_2)	2 660	4 820	12.1	325
Propileno[c] (C_3H_6)	2 900	5 250	89.4	2 400
Propano (C_3H_8)	2 526	4 579	93.1	2 498
Gas natural[d]	2 538	4 600	37.3	1 000

Recopilado de [9].

[a]Se comparan las temperaturas neutrales de flama, dado que ésta es la flama que se usaría más comúnmente para soldadura.

[b]MAPP es la abreviatura comercial para el metilacetileno-propadieno.

[c]El propileno se usa principalmente en el corte con flama.

[d]Los datos se basan en el gas metano (CH_4); el gas natural consta de etano (C_2H_6) así como de metano; la temperatura de flama y el calor de combustión varían según la composición.

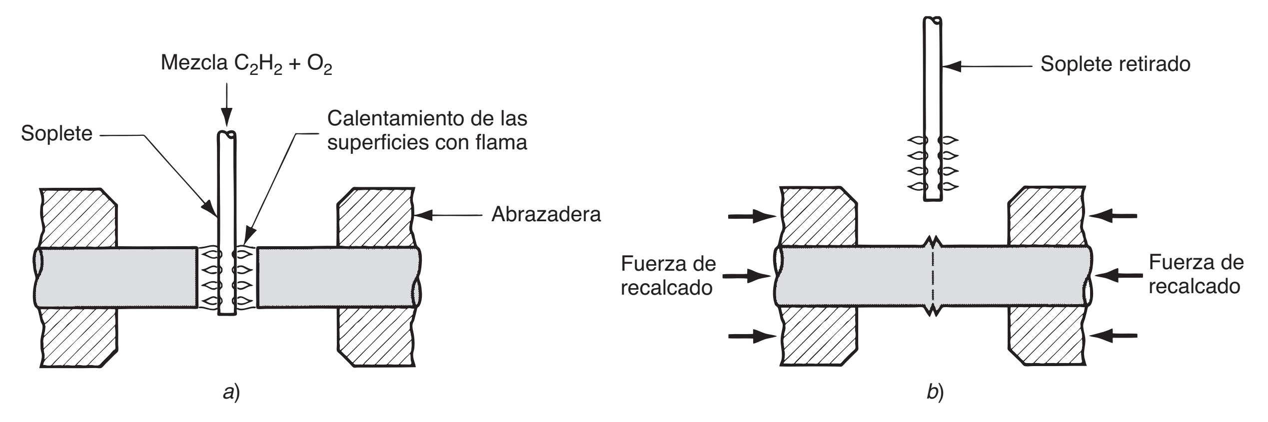


FIGURA 31.23 Una aplicación de soldadura con gas a presión: *a*) calentamiento de las dos piezas y *b*) aplicación de presión para formar la soldadura.

(sección 32.1). Además, algunos usuarios prefieren estos gases alternativos por razones de seguridad.

El combustible que compite de manera más cercana con el acetileno por la temperatura a la que arde y el valor de calentamiento es el metilacetileno-propadieno. Es un combustible desarrollado por la compañía Dow Chemical y su nombre comercial es ***MAPP*** (se agradece a Dow la abreviatura). El MAPP (C_3H_4) tiene características de calentamiento similares a las del acetileno y puede almacenarse bajo presión como un líquido, con lo que se evitan los problemas de almacenamiento especial asociados con el C_2H_2.

Cuando se quema hidrógeno con oxígeno como combustible, el proceso se denomina ***soldadura de oxihidrógeno*** (OHW, por sus siglas en inglés). Como se muestra en la tabla 31.2, la temperatura de la OHW es menor a la que se obtiene en la soldadura con oxiacetileno. Además, el color de la flama no se ve afectado por diferencias en la mezcla de hidrógeno y oxígeno; por tanto es más difícil que el soldador ajuste el soplete.

Otros combustibles utilizados en la OFW incluyen el propano y el gas natural. El propano (C_3H_8) se asocia más estrechamente con operaciones de soldadura dura, soldadura suave y corte que con la soldadura por fusión. El gas natural está formado principalmente de etano (C_2H_6) y metano (CH_4). Cuando se mezcla con oxígeno produce una flama de alta temperatura y se ha vuelto más común en talleres de soldadura pequeños.

Soldadura por gas a presión Éste es un proceso especial de la OFW; se distingue más por el tipo de aplicación que por el gas combustible. La ***soldadura por gas a presión*** (PGW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura por fusión, mediante el cual se obtiene la coalescencia sobre todas las superficies de contacto de las dos piezas, calentándolas con una mezcla de combustible apropiada (por lo general gas oxiacetileno) y después aplicando presión para unir las superficies. En la figura 31.23 se muestra una aplicación típica. Las piezas se calientan hasta que empieza la fusión en las superficies. Después se retira el soplete de calentamiento, se oprimen las piezas una contra otra y se sostienen a presiones altas mientras ocurre la solidificación. En la PGW no se usa metal de relleno.

31.4 OTROS PROCESOS DE SOLDADURA POR FUSIÓN

Algunos procesos de soldadura por fusión no pueden clasificarse como soldadura con arco eléctrico, por resistencia o con oxígeno y gas combustible. Todos estos procesos usan una tecnología única para generar el calor y lograr la fusión; y por lo regular las aplicaciones son singulares.

31.4.1 Soldadura con haz de electrones

La ***soldadura con haz de electrones*** (EBW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura por fusión en el cual el calentamiento para el proceso se proporciona mediante una corriente de electrones muy concentrada, de alta intensidad, que choca contra la superficie de trabajo. El equipo es similar al que se usa para el maquinado con haz de electrones (sección 26.3.2). La pistola de haz de electrones opera a alto voltaje para acelerar los electrones (por ejemplo, lo típico es de 10 a 150 kV) y las corrientes del haz son bajas (medidas en miliamperes). La potencia en la EBW no es excepcional, pero sí su densidad de potencia. Una alta densidad de potencia se obtiene al concentrar el haz de electrones sobre un área muy pequeña de la superficie de trabajo, de modo que la densidad de potencia PD se basa en

$$PD = \frac{f_1 EI}{A} \tag{31.5}$$

donde PD = densidad de potencia, W/mm^2 (W/in^2, que puede convertirse a Btu/s−in^2 al dividir entre 1 055); f_1 = factor de transferencia de calor (los valores típicos para la soldadura con haz de electrones varían de 0.8 a 0.95 [8]); E = voltaje de aceleración, V; I = corriente del haz, A; y A = el área de la superficie de trabajo en la que se concentra el haz de electrones, mm^2 (in^2). Las áreas típicas para la EBW varían de 13×10^{-3} a $2\,000 \times 10^{-3}$ mm^2 (20×10^{-6} a $3\,000 \times 10^{-6}$ in^2).

El proceso tiene sus inicios en la década de 1950 en el campo de la energía atómica. La primera vez que se desarrolló tuvo que realizarse en una cámara de vacío para evitar que las moléculas de aire trastornaran el haz de electrones. Este requerimiento sigue siendo un serio inconveniente en la producción, debido al tiempo requerido para vaciar la cámara antes de la soldadura. El tiempo de bombeo, como se le denomina, puede requerir hasta una hora, dependiendo del tamaño de la cámara y del nivel de vacío requerido. En la actualidad, la tecnología para la EBW ha avanzado y algunas operaciones se ejecutan sin vacío. Pueden distinguirse tres categorías: 1) ***soldadura al alto vacío*** (EBW-HV, por sus siglas en inglés), en la cual la soldadura se realiza en el mismo vacío que se usa para la generación del haz; 2) ***soldadura al medio vacío*** (EBW-MV, por sus siglas en inglés), en la cual la operación se ejecuta en una cámara separada donde sólo se obtiene un vacío parcial; y 3) ***soldadura sin vacío*** (EBW-NV, por sus siglas en inglés), en la cual la soldadura se realiza a una presión atmosférica normal o casi normal. El tiempo de bombeo durante la carga y descarga de la pieza de trabajo puede reducirse en la EBW al medio vacío y minimizarse en la EBW sin vacío, pero debe pagarse un precio por esta ventaja. En las dos últimas operaciones, el equipo debe incluir uno o más divisores de vacío (orificios muy pequeños que impiden el flujo del aire, pero permiten el paso de un haz de electrones) para separar el generador del haz (el cual requiere un alto vacío) de la cámara de trabajo. Asimismo, en la EBW sin vacío, el trabajo primero debe ubicarse cerca del orificio de la pistola de haz de electrones, aproximadamente a 13 mm (0.5 in) o menos. Por último, en los procesos con un vacío más bajo no puede obtenerse alta calidad en la soldadura, como tampoco la relación entre profundidad y anchura que se obtiene en la EBW-HV.

Cualquier metal que pueda soldarse con arco también puede recibir soldadura con EBW, al igual que ciertos metales refractarios difíciles de soldar que no son convenientes para la AW. Los tamaños del trabajo de láminas metálicas varían de placas delgadas a gruesas. La EBW se aplica principalmente en las industrias de automóviles, la aeronáutica, la aeroespacial y la nuclear. En la industria automotriz, el ensamble mediante EBW incluye colectores de aluminio, convertidores de torque de acero, convertidores catalíticos y componentes de la transmisión. En éstas y otras aplicaciones son notables las siguientes ventajas de la soldadura con haz de electrones: soldaduras de alta calidad con perfiles profundos o estrechos o ambos, zonas afectadas por el calor bien delimitadas y baja distorsión térmica. Las velocidades de soldadura son altas en comparación con otras operaciones de soldadura continua. No se usa metal de relleno, ni se necesitan fundentes ni gases protectores. Las desventajas de la EBW son el equipo costoso, la necesidad de preparación y alineación precisas de la unión, y las limitaciones asociadas con la ejecución del proceso en el vacío, como ya se ha analizado. Además, existen aspectos de seguridad, debido a que la EBW genera rayos X de los que deben protegerse los humanos.

31.4.2 Soldadura con haz o rayo láser

La ***soldadura con haz láser*** (LBW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura por fusión en el cual se obtiene la coalescencia mediante la energía de un haz luminoso coherente altamente concentrado y enfocado a la unión que se va a soldar. El término ***láser*** es un acrónimo de la expresión en inglés “amplificación luminosa mediante la emisión estimulada de radiaciones” (***l***ight ***a***mplification by ***s***timulaled ***e***mission of ***r***adiation). Esta misma tecnología se usa para el maquinado con haz láser (sección 26.3.3). La LBW se realiza normalmente con gases protectores (por ejemplo, helio, argón, nitrógeno y dióxido de carbono) para evitar la oxidación. Por lo general no se agrega metal de relleno.

La LBW produce acabados de alta calidad, profunda penetración y una estrecha zona afectada por el calor. Estas características son similares a las que se obtienen en la soldadura con haz de electrones y con frecuencia los dos procesos son comparables. Existen varias ventajas de la LBW sobre la EBW: no se requiere una cámara de vacío, no se emiten rayos X y los rayos láser pueden enfocarse y dirigirse mediante lentes ópticos y espejos. Por otro lado, la LBW no posee la capacidad para realizar soldaduras profundas, ni la alta relación entre profundidad y anchura que posee la EBW. La profundidad máxima en la soldadura con láser es aproximadamente de 19 mm (0.75 in), mientras que la EBW puede usarse para profundidades de 50 mm (2 in) o más; y la relación entre profundidad y anchura en la LBW normalmente está limitada alrededor de 5:1. Debido a la energía altamente concentrada en un área pequeña del haz láser, con frecuencia el proceso se usa para unir piezas pequeñas.

31.4.3 Soldadura con electroescoria

La soldadura con electroescoria (ESW, por sus siglas en inglés) usa el mismo equipo básico de algunos procesos de soldadura con arco eléctrico y utiliza un arco para iniciar la operación de soldadura. Sin embargo, no es un proceso de AW porque durante la soldadura no se usa ningún arco. La ***soldadura con electroescoria*** (ESW) es un proceso de soldadura por fusión en el cual se obtiene la coalescencia mediante escoria fundida caliente y altamente conductiva, que actúa sobre las piezas base y el metal de relleno. Como se muestra en la figura 31.24, la configuración general de la soldadura con electroescoria es similar a la de la soldadura electro-gaseosa. Se realiza en orientación vertical (la que se muestra aquí es para soldadura empalmada), usando zapatas de moldeo enfriadas por agua para contener la escoria fundida y el metal soldado. Al principio del proceso, se coloca en la cavidad un fundente conductivo granulado. La punta del electrodo consumible se coloca cerca de la parte inferior de la cavidad y se genera un arco eléctrico por un momento para iniciar la fusión del fundente. Una vez creado el pozo de escoria, el arco se extingue y la corriente pasa del electrodo al metal base a través de la escoria conductiva, de modo que su resistencia eléctrica genera el calor necesario para mantener el proceso de soldadura. Como la densidad de la escoria es menor que la del metal fundido, ésta permanece en la parte superior para proteger el pozo de soldadura. La solidificación ocurre desde la parte inferior, mientras que el electrodo y los bordes de las piezas base proporcionan metal fundido adicional. El proceso continúa en forma gradual hasta que llega a la parte superior de la unión.

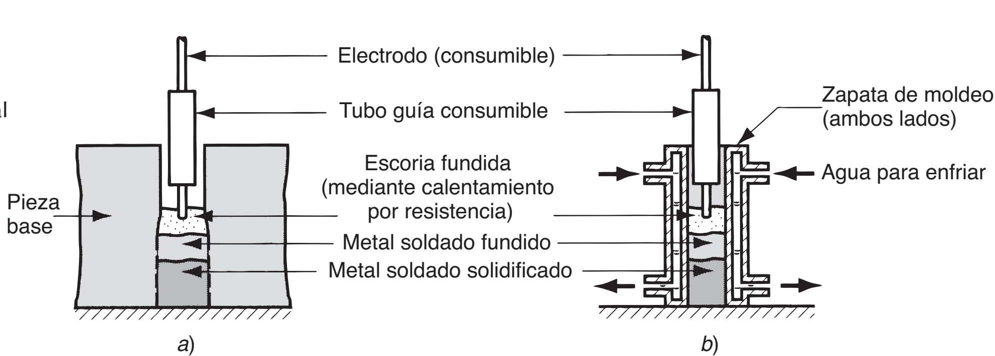


FIGURA 31.24 Soldadura con electroescoria (ESW): *a*) vista frontal con zapatas de moldeo removidas para mayor claridad; *b*) vista lateral que muestra un esquema de la zapata de moldeo. La disposición es similar a la soldadura electrogaseosa (figura 31.7) excepto porque se usa el calentamiento por resistencia de la escoria fundida para derretir los metales base y de relleno.

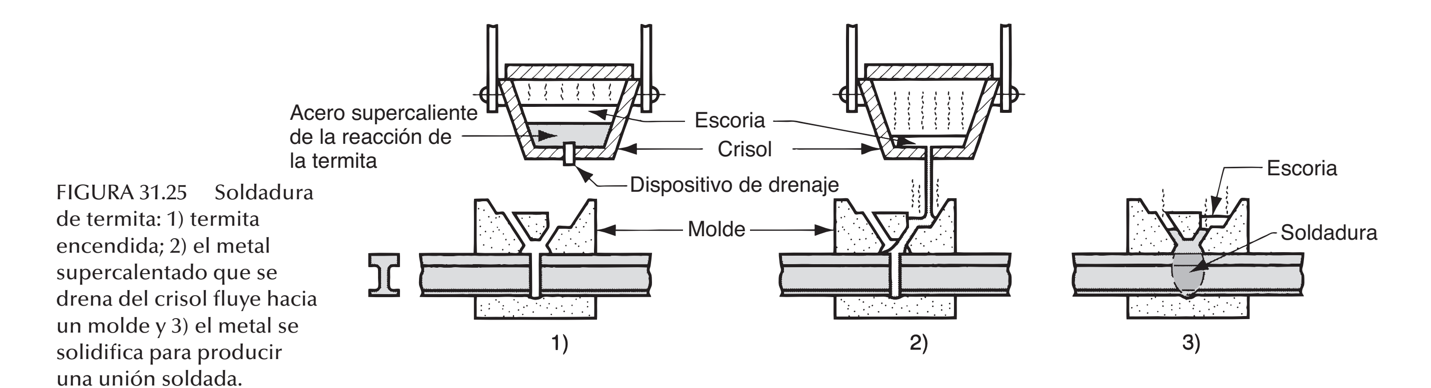


FIGURA 31.25 Soldadura de termita: 1) termita encendida; 2) el metal supercalentado que se drena del crisol fluye hacia un molde y 3) el metal se solidifica para producir una unión soldada.

31.4.4 Soldadura con termita

El término ***Thermit*** es el nombre de una marca comercial para la ***termita***, una mezcla de polvo de aluminio y óxido de hierro que produce una reacción exotérmica cuando se enciende. Es una sustancia usada en bombas incendiarias y para soldadura. Como un proceso de soldadura, el uso de termita data aproximadamente de 1900. La ***soldadura con termita*** (TW, por sus siglas en inglés) es un proceso de fusión en el cual el calor para la coalescencia se produce mediante el metal fundido supercalentado de la reacción química de la termita. El metal de relleno se obtiene a partir del metal líquido y, aunque el proceso se usa para unir, es más común en las fundiciones que en la soldadura.

Cuando los polvos de aluminio y óxido de hierro finamente mezclados (en una proporción de 1:3) se encienden a una temperatura aproximada a 1 300 °C (2 300 °F), producen la siguiente reacción química:

$$8Al + 3Fe_3O_4 \rightarrow 9Fe + 4Al_2O_3 + \text{calor} \tag{31.6}$$

La temperatura aproximada de la reacción es de 2 500 °C (4 500 °F), durante la cual se produce un hierro fundido supercalentado más óxido de aluminio, que flota en la parte superior como escoria y protege al hierro de la atmósfera. En la soldadura con termita, el hierro supercalentado (o acero, si la mezcla de polvo se formula con tal propósito) se coloca en un crisol encima de la unión que se va soldar, como se indica en el diagrama del proceso de TW de la figura 31.25. Después de que termina la reacción (alrededor de 30 segundos, sin tomar en consideración la cantidad de termita que se use), el crisol se drena y el metal líquido fluye dentro de un molde construido especialmente para rodear la unión soldada. Debido a que la entrada del metal es tan caliente, funde los bordes de las piezas base, produciendo coalescencia tras la solidificación. Después de enfriarse, se rompe el molde y se retiran las compuertas y mazarotas mediante soplete de oxiacetileno u otro método.

La soldadura con termita tiene aplicaciones en la unión de rieles de ferrocarril (como se presenta en la figura), y en la reparación de grietas en fundiciones y forjados de acero grandes como moldes de lingotes, flechas de diámetro grande, armazones para maquinaria y timones de embarcaciones. La superficie de la soldadura en estas aplicaciones con frecuencia es lo bastante lisa para que no se requiera un acabado subsecuente.

31.5 SOLDADURA DE ESTADO SÓLIDO

En la soldadura de estado sólido, la coalescencia de las superficies de la pieza se obtiene 1) mediante presión solamente o 2) por calor y presión. Para algunos procesos de estado sólido, el tiempo también es un factor. Si se usan calor y presión, la cantidad de calor por sí misma no es suficiente para producir la fusión de las superficies de trabajo. En otras palabras, no ocurrirá la fusión de las piezas usando solamente el calor que se aplica en forma externa para estos procesos. En algunos casos, la combinación de calor y presión o el modo particular en el que se aplica la presión sola, genera suficiente energía para producir una

fusión localizada de las superficies de empalme. En la soldadura de estado sólido, no se añade metal de relleno.

31.5.1 Consideraciones generales en la soldadura de estado sólido

En la mayoría de los procesos de soldadura de estado sólido se crea una unión metalúrgica con poca o ninguna fusión de los metales base. A fin de unir metalúrgicamente dos metales similares o diferentes, debe establecerse un contacto íntimo entre los dos metales para que sus fuerzas atómicas cohesivas se atraigan una a la otra. En el contacto físico normal entre dos superficies, la presencia de películas químicas, gases, aceites y similares prohíbe tal contacto íntimo. Para que tenga éxito la unión atómica, deben removerse estas películas y demás sustancias. En la soldadura por fusión (al igual que en otros procesos de unión, como la soldadura dura y la soldadura suave), las películas se disuelven o se queman mediante altas temperaturas para establecer una unión atómica mediante la fusión y solidificación de los metales en estos procesos. Pero en la soldadura de estado sólido, deben removerse las películas y otros contaminantes mediante otros métodos para permitir que ocurra la unión metalúrgica. En algunos casos, se hace una completa limpieza de las superficies justo antes del proceso de soldadura; mientras que en otros casos, la acción de limpieza se realiza como una parte integral del acercamiento de las superficies de las piezas. En resumen, los ingredientes esenciales para una soldadura de estado sólido exitosa son que las dos superficies deben estar muy limpias y deben ponerse en un contacto muy estrecho entre sí para permitir la unión atómica.

Los procesos de soldadura que no implican una fusión tienen varias ventajas sobre los procesos de soldadura por fusión. Si no ocurre la fusión, entonces no hay una zona afectada por el calor, por lo que el metal que rodea la unión conserva sus propiedades originales. Muchos de estos procesos producen uniones soldadas que incluyen toda la interfaz de contacto entre las dos piezas, y no en distintos puntos o costuras, como en la mayoría de las operaciones de soldadura por fusión. También, algunos de estos procesos son aplicables para unir metales distintos, sin tomar en cuenta las expansiones térmicas relativas, las conductividades y otros problemas que surgen normalmente durante la fundición y solidificación de distintos metales.

31.5.2 Procesos de soldadura de estado sólido

El grupo de soldadura de estado sólido incluye el proceso de unión más antiguo, así como algunos de los más modernos. Todos los procesos en este grupo tienen una forma única de crear la unión en las superficies de empalme. La cobertura comienza con la soldadura por forjado, el primer proceso de soldadura.

Soldadura por forjado La ***soldadura por forjado*** tiene importancia histórica en el desarrollo de la tecnología de manufactura. El proceso data de alrededor del año 1000 a. C., cuando los herreros del mundo antiguo aprendieron a unir dos piezas de metal (nota histórica 30.1). La ***soldadura por forjado*** es un proceso en el cual los componentes que se van a unir se calientan a una temperatura de trabajo y después se forjan juntos por medio de un martillo u otro medio. Se requiere la habilidad del artesano que lo realiza para obtener una buena soldadura bajo las normas actuales. El proceso puede tener interés histórico; sin embargo, actualmente posee una mínima importancia comercial excepto por algunas de sus variantes que se analizan a continuación.

Soldadura en frío La ***soldadura en frío*** (CW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura en estado sólido que se realiza aplicando alta presión entre superficies en contacto a temperatura ambiente. Las superficies de empalme deben estar excepcionalmente limpias para que funcione la CW, y por lo general esta limpieza se hace mediante un desengrasado y pulido de alambre exactamente antes de la unión. También, al menos uno de los metales que se van a soldar, y de preferencia ambos, deben ser muy dúctiles y libres de endurecimiento por trabajo. Los metales como el aluminio suave y el cobre pueden

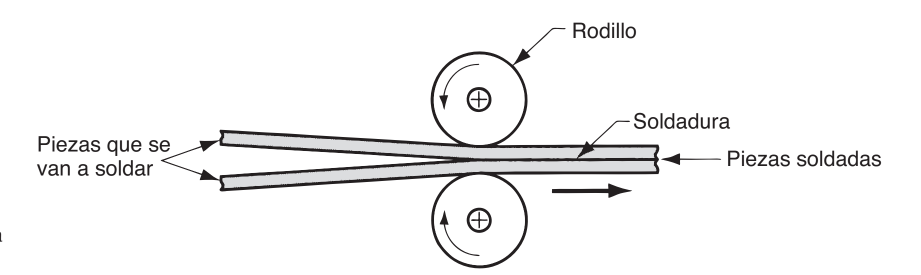


FIGURA 31.26 Soldadura con rodillos (ROW).

soldarse en frío con facilidad. Las fuerzas de compresión aplicadas en el proceso producen el trabajo en frío de las piezas metálicas y reducen el espesor hasta en 50%, pero también producen deformación plástica localizada en las superficies de contacto, produciendo coalescencia. Para piezas pequeñas, las fuerzas se aplican mediante herramientas sencillas operadas en forma manual. Para trabajo más pesado se requieren prensas poderosas para ejercer la fuerza necesaria. En la CW no se aplica calor de fuentes externas, pero el proceso de deformación eleva algo la temperatura del trabajo. Las aplicaciones de la CW incluyen la fabricación de conexiones eléctricas.

Soldadura con rodillos La soldadura con rodillos es una variación de la soldadura por forjado o de la soldadura en frío, dependiendo de si se obtiene o no el calentamiento externo de las piezas de trabajo antes del proceso. La ***soldadura con rodillos*** (ROW, por sus siglas en inglés) es un proceso en estado sólido en el cual se aplica una presión suficiente para producir coalescencia mediante rodillos, ya sea con o sin aplicación externa de calor. El proceso se ilustra en la figura 31.26. Si no se suministra calor externo, el proceso se denomina ***soldadura con rodillos en frío***; si se proporciona calor, se usa el término ***soldadura con rodillos en caliente***. Las aplicaciones de la soldadura con rodillos incluyen el revestimiento con acero inoxidable para aleaciones medias o bajas a fin de conseguir resistencia a la corrosión, la fabricación de tiras bimetálicas para medir la temperatura y la producción de monedas acuñadas tipo "emparedado".

Soldadura con presión en caliente La ***soldadura con presión en caliente*** (HPW, por sus siglas en inglés) es otra variable de la soldadura por forjado, en el cual ocurre la coalescencia por la aplicación de calor y presión suficientes para producir una deformación considerable de los metales base. La deformación rompe la película de óxido de la superficie y deja limpio el metal para establecer una buena unión entre las dos piezas. Debe permitirse que pase un tiempo para que ocurra la difusión a través de las superficies de empalme. Por lo general, la operación se realiza en una cámara de vacío o en la presencia de un medio protector. Las aplicaciones principales de la HPW están en la industria aeroespacial.

Soldadura por difusión La ***soldadura por difusión*** (DFW, por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura en estado sólido que resulta de la aplicación de calor y presión, por lo general en una atmósfera controlada, durante el tiempo suficiente para que ocurran la difusión y la coalescencia. Las temperaturas están muy abajo de los puntos de fusión de los metales (el máximo está en alrededor de 0.5 T_m) y la deformación plástica en la superficie es mínima. El mecanismo primordial de coalescencia se lleva a cabo mediante la difusión en estado sólido, que implica la migración de átomos a través de la interfaz entre las superficies que hacen contacto. Las aplicaciones de la DFW incluyen la unión de metales refractarios y de alta resistencia en las industrias aeroespacial y nuclear. El proceso se usa para unir metales tanto similares como diferentes y, en este último caso, con frecuencia se introduce entre los metales distintos una capa de relleno para ayudar a la difusión de los dos metales base. El tiempo requerido para que ocurra la difusión entre las superficies de empalme puede ser significativo, en algunas aplicaciones puede requerirse más de una hora [9].

Soldadura explosiva La ***soldadura explosiva*** (EXW, por sus siglas en inglés) es un proceso de estado sólido en el cual se produce una rápida coalescencia de dos superficies metálicas mediante la energía de un explosivo detonado. Por lo general se usa para unir dos

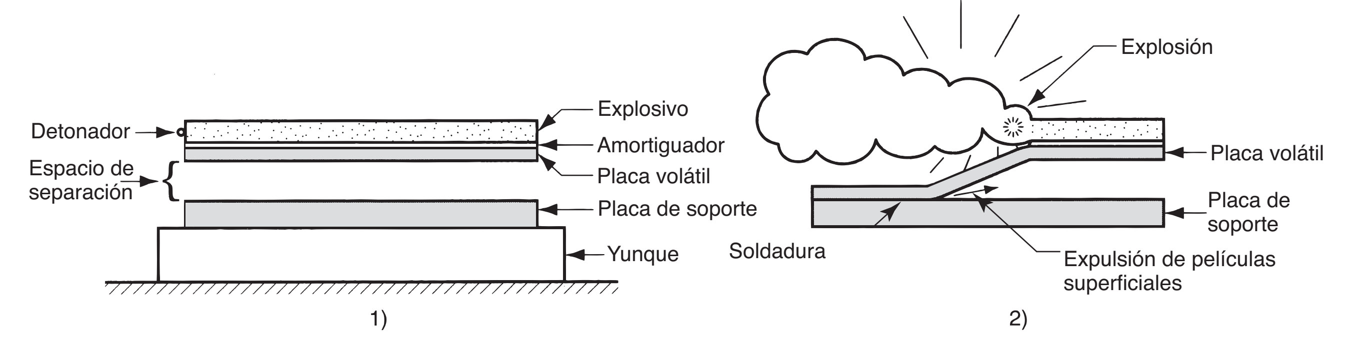


FIGURA 31.27 Soldadura explosiva (EXW): 1) disposición en la configuración paralela y 2) durante la detonación de la carga explosiva.

metales distintos, en particular para revestir un metal sobre un metal base en áreas grandes. Las aplicaciones incluyen la producción de materias primas de láminas y placas resistentes a la corrosión destinadas a la fabricación de equipo de procesamiento en las industrias química y petrolera. En este contexto se utiliza el término ***revestimiento por explosión***. En la EXW no se usa un metal de relleno ni se aplica calor externo. Además, durante el proceso no ocurre difusión (el tiempo es demasiado corto). La naturaleza de la unión es metalúrgica, en muchos casos combinada con un entrelazado mecánico producido por una interfaz ondulada o rizada entre los metales.

El proceso para revestir una placa de metal sobre otra puede describirse con referencia a la figura 31.27. En esta disposición, las dos placas están en una configuración paralela y a una cierta distancia de separación, con la carga explosiva encima de la parte superior, denominada la ***placa volátil***. Con frecuencia se usa una capa amortiguadora (por ejemplo, de caucho o de plástico) entre el explosivo y la placa volátil para proteger su superficie. La placa inferior, denominada metal ***de soporte***, descansa en un yunque para apoyo. Cuando se inicia la detonación, la carga explosiva se propaga de un extremo de la placa volátil al otro, como se aprecia en la vista de acción interrumpida que se muestra en la figura 31.27(2). Una de las dificultades para comprender lo que sucede en la EXW es el concepto erróneo común de que ocurre una explosión de manera instantánea; en realidad es una reacción progresiva, aunque ciertamente muy rápida, que se propaga a velocidades de hasta 8 500 m/s (28 000 ft/s). La zona de alta presión resultante impulsa la placa volátil para que choque con el metal de soporte de manera progresiva y a alta velocidad, por lo que toma una forma angular conforme avanza la explosión, como se ilustra en el esquema. La placa superior permanece en posición en la región donde el explosivo todavía no ha detonado. Como la colisión ocurre a alta velocidad en una forma progresiva y angular, provoca que las superficies se vuelvan inestables en el punto de contacto y las películas de superficie son expelidas hacia adelante desde el ápice del ángulo. Por lo tanto, las superficies que chocan están químicamente limpias, y el comportamiento del fluido del metal, que implica una cierta fusión interfacial, proporciona un contacto íntimo entre las superficies y conduce a la unión metalúrgica. Las variaciones en la velocidad de choque y el ángulo de impacto durante el proceso pueden provocar una interfaz ondulada o rizada entre los dos metales. Este tipo de interfaz fortalece la unión, debido a que aumenta el área de contacto y tiende a entrelazar mecánicamente las dos superficies.

Soldadura por fricción La soldadura por fricción es un proceso comercial ampliamente usado y es conveniente para los métodos de producción automatizada. El proceso fue creado en la antigua Unión Soviética, y fue introducido en Estados Unidos alrededor de 1960. La ***soldadura por fricción*** (FRW, por sus siglas en inglés) es un proceso en estado sólido en el cual se obtiene la coalescencia mediante una combinación de calor por fricción y presión. La fricción se induce mediante el frotamiento mecánico entre las dos superficies, generalmente por la rotación de una pieza respecto a la otra, con el propósito de elevar la temperatura en la interfaz de unión hasta un rango de trabajo caliente para los metales involucrados. Después, las piezas se dirigen una hacia otra con suficiente fuerza para for-

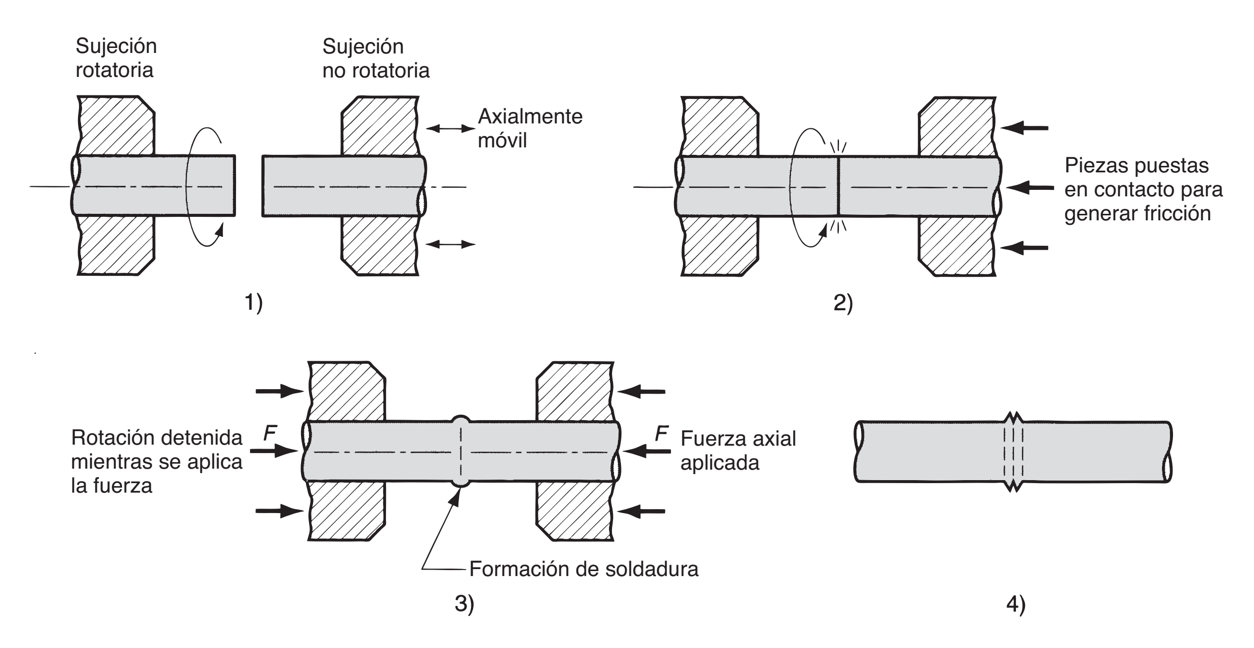


FIGURA 31.28 Soldadura por fricción (FRW): 1) pieza rotatoria, sin contacto; 2) piezas puestas en contacto para generar calor por fricción; 3) rotación detenida y presión axial aplicada; y 4) soldadura creada.

mar una unión metalúrgica. La secuencia se ilustra en la figura 31.28 para soldar dos piezas cilíndricas, la aplicación típica del proceso. La fuerza de compresión axial recalca las piezas y se produce un reborde por el material desplazado. Cualquier película superficial que se encuentre sobre las superficies de contacto es expulsada durante el proceso. Después debe emparejarse el reborde (por ejemplo, por torneado) para proporcionar una superficie lisa en la región soldada. Cuando se realiza en forma correcta, no ocurre una fusión en las superficies de empalme. Normalmente no se usa metal de relleno, ni fundentes o gases protectores.

Casi todas las operaciones de FRW usan la rotación para generar el calor por fricción necesario para la soldadura. Existen dos sistemas de conducción principales que distinguen dos tipos de FRW: 1) soldadura por fricción de conducción continua y 2) soldadura por fricción con inercia. En la ***soldadura por fricción de conducción continua*** se dirige una pieza a una velocidad de rotación constante y se impone un contacto con la pieza estacionaria a cierto nivel de fuerza, para que se genere calor por fricción en la interfaz. Cuando se alcanza la temperatura de trabajo correcta, se frena la rotación en forma abrupta y de manera simultánea se juntan las piezas a presiones de forjado. En la ***soldadura por fricción con inercia***, la pieza rotatoria se conecta a un volante, el cual se acelera a una velocidad predeterminada. Después, se desconecta el volante del motor de conducción y se aprietan las piezas. La energía cinética almacenada en el volante se disipa en forma de calor por fricción para producir la coalescencia en las superficies de empalme. El ciclo total para estas operaciones es de alrededor de 20 segundos.

Las máquinas usadas para la soldadura por fricción tienen el aspecto de un torno de motor. Requieren que un mandril con corriente haga girar una pieza a alta velocidad y un medio para aplicar una fuerza axial entre la pieza rotatoria y la no rotatoria. Con sus ciclos breves, el proceso se presta para la producción masiva. Se aplica en la soldadura de diversas flechas y piezas tubulares en las industrias automotriz, aeronáutica, agrícola, petrolera y del gas natural. El proceso produce una estrecha zona afectada por el calor y puede usarse para unir metales distintos. Sin embargo, al menos una de las piezas debe ser giratoria, por lo general deben removerse las rebabas y el recalcado reduce la longitud de las piezas (lo cual debe tomarse en consideración para el diseño de productos).

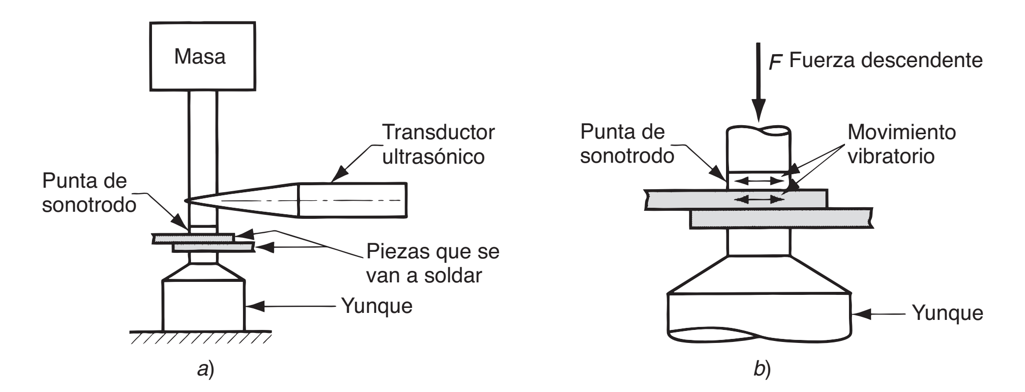


FIGURA 31.29 Soldadura ultrasónica (USW): *a*) disposición general para una unión sobrepuesta; y *b*) acercamiento del área soldada.

Soldadura ultrasónica La ***soldadura ultrasónica*** (USW, por sus siglas en inglés) es un proceso en estado sólido en el cual se integran dos componentes bajo fuerzas de sujeción modestas y se aplican intensas presiones oscilatorias de frecuencia ultrasónica a la interfaz para producir la coalescencia. La operación se ilustra en la figura 31.29 para la soldadura superpuesta, que es la aplicación típica. El movimiento oscilatorio entre las dos piezas deshace las películas de superficie para permitir un contacto íntimo y una fuerte unión metalúrgica entre las superficies. Aunque ocurre un calentamiento de las superficies que hacen contacto debido a la fricción interfacial y a la deformación plástica, las temperaturas resultantes están bastante abajo del punto de fusión. En la USW no se requieren metales de relleno, fundentes, ni gases protectores.

El movimiento oscilatorio se trasmite a la pieza de trabajo superior mediante un ***sonotrodo***, que está acoplado a un transductor ultrasónico. Este dispositivo convierte la energía eléctrica en un movimiento vibratorio de alta frecuencia. Las frecuencias típicas usadas en la USW son de 15 a 75 kHz, y las amplitudes varían de 0.018 a 0.13 mm (0.0007 a 0.005 in). Las presiones de sujeción son mucho menores que las que se usan en la soldadura en frío y no producen una deformación plástica importante entre las superficies. Bajo estas condiciones, los tiempos de soldadura son menores a un segundo.

Por lo general, las operaciones de USW están limitadas a uniones superpuestas sobre materiales suaves, como el aluminio y el cobre. La soldadura de materiales más duros provoca un desgaste rápido del sonotrodo que hace contacto con la pieza de trabajo superior. Las piezas de trabajo deben ser relativamente pequeñas y la soldadura de espesores menores a 3 mm (1/8 in) es el caso típico. Las aplicaciones incluyen terminación y empalmado de cables en las industrias eléctrica y electrónica (lo cual elimina la necesidad de soldadura suave), el ensamble de paneles de lámina metálica de aluminio, la soldadura de tubos para láminas en paneles solares, así como otras tareas de ensamble de piezas pequeñas.

31.6 CALIDAD DE LA SOLDADURA

El propósito de cualquier proceso de soldadura es unir dos o más componentes en una sola estructura. Por lo tanto, la integridad física de la estructura formada depende de la calidad de la soldadura. El análisis de la calidad de la soldadura se enfoca primordialmente en la soldadura con arco, el proceso más difundido y para el cual el aspecto de la calidad es el más importante y complejo.

31.6.1 Esfuerzos y distorsiones residuales

El calentamiento y enfriamiento rápidos en regiones localizadas del trabajo durante la soldadura por fusión, especialmente la soldadura con arco eléctrico, producen expansiones

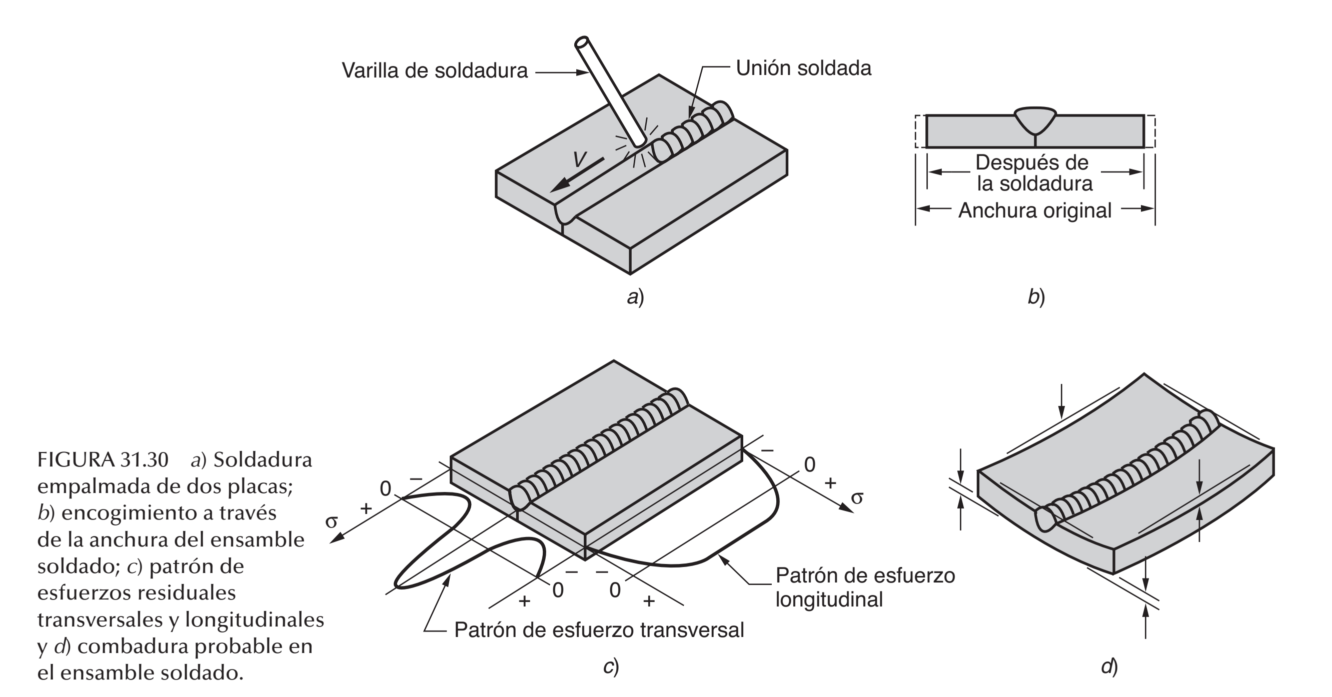


FIGURA 31.30 *a*) Soldadura empalmada de dos placas; *b*) encogimiento a través de la anchura del ensamble soldado; *c*) patrón de esfuerzos residuales transversales y longitudinales y *d*) combadura probable en el ensamble soldado.

y contracciones térmicas, que causan esfuerzos residuales en la soldadura. Estos esfuerzos, por su lado, provocan distorsión y combadura del ensamble soldado.

La situación en la soldadura es complicada porque 1) el calentamiento está muy localizado, 2) la fusión de los metales base ocurre en estas regiones locales y 3) la ubicación del calentamiento y la fusión está en movimiento (al menos en la soldadura con arco). Por ejemplo, considere la soldadura empalmada de dos placas mediante una operación de soldadura con arco como se muestra en la figura 31.30a. La operación empieza en un extremo y viaja al lado opuesto. Conforme avanza, se forma un pozo fundido del metal base (y de metal de relleno, si se usa alguno), que se solidifica con rapidez detrás del arco en movimiento. Las piezas del trabajo inmediatamente adyacentes a la gota de soldadura se calientan de manera extremada y se expanden, mientras que las porciones removidas de la soldadura permanecen relativamente frías. El pozo de soldadura se solidifica con rapidez en la cavidad entre las dos piezas y, conforme el metal circundante se enfría y contrae, ocurre un encogimiento a través de la anchura de la soldadura, como se observa en la figura 31.30b. La costura de la soldadura permanece en esfuerzo residual y se acumulan esfuerzos compresivos de reacción en las regiones de las piezas lejanas a la soldadura. También ocurren esfuerzos residuales y encogimiento a lo largo de la gota de soldadura. Como las regiones exteriores de las piezas base han permanecido relativamente frías y sin cambios de dimensión, mientras que la gota de soldadura se ha solidificado a temperaturas muy altas y después se ha contraído, los esfuerzos residuales permanecen en forma longitudinal en la gota de soldadura. Estos patrones de esfuerzo transversal y longitudinal se muestran en la figura 31.30c. El resultado neto de estos esfuerzos residuales, en forma transversal y longitudinal, probablemente produzca una combadura en el ensamble soldado, como se muestra en la figura 31.30d.

La unión empalmada soldada con arco del ejemplo es sólo uno de los diversos tipos de uniones y operaciones de soldadura. Los esfuerzos residuales inducidos en forma térmica y la distorsión implícita son un problema potencial en casi todos los procesos de soldadura por fusión y en ciertas operaciones de soldadura de estado sólido, en las cuales ocurre un calentamiento significativo. Pueden usarse varias técnicas para minimizar la combadura en una soldadura:

➢ ***Soportes de soldadura*** pueden usarse para limitar físicamente el movimiento de las piezas durante el proceso de soldadura.

- ***Inmersiones en caliente*** pueden usarse para eliminar rápidamente el calor de las secciones de las piezas soldadas y así reducir la distorsión.
- ***Soldadura de tachuelas*** en múltiples puntos a lo largo de la unión, para crear una estructura rígida antes de una soldadura de costura continua.
- ***Condiciones para la soldadura*** (velocidad, cantidad de metal de relleno usado, etcétera) pueden usarse para reducir la combadura.
- ***Precalentamiento*** de las piezas base, para reducir el nivel de esfuerzo térmico que experimentan las piezas.
- ***Liberación de esfuerzo*** mediante un tratamiento térmico en el ensamble soldado, ya sea en un horno para soldaduras pequeñas o usando métodos que puedan realizarse en el campo para estructuras grandes.
- ***Diseño apropiado*** de la soldadura para reducir el grado de combadura (véase la sección 31.8).

31.6.2 Defectos de la soldadura

Además de los esfuerzos residuales y la distorsión en el ensamble final, pueden ocurrir otros defectos en la soldadura. A continuación se da una breve descripción de cada una de las categorías importantes, con base en una clasificación de Cary [2].

Grietas Las grietas son interrupciones tipo fractura en la soldadura misma o en el metal base adyacente a la soldadura. Este tipo es tal vez el defecto de soldadura más serio, porque constituye una discontinuidad en el metal, que produce una importante reducción de la resistencia de la soldadura. En la figura 31.31 se definen varias formas. Las grietas en la soldadura se originan porque la soldadura o el metal base o ambos son frágiles o tienen baja ductilidad, combinadas con una fijación alta durante la contracción. Por lo general, este defecto debe repararse.

Cavidades Éstas incluyen diversos defectos de porosidad y contracción. La ***porosidad*** consiste en pequeños defectos en el metal de la soldadura, formados por gases atrapados durante la solidificación. Los defectos pueden tener forma esférica (huecos en forma de burbuja) o alargada (huecos en forma de gusano). Usualmente, la porosidad es resultado de la inclusión de gases atmosféricos, azufre en el metal de soldadura o contaminantes en las superficies. Los ***huecos de encogimiento*** son cavidades formadas por el encogimiento durante la solidificación. Estos dos tipos de defectos tipo cavidad son semejantes a los defectos que se encuentran en las fundiciones y enfatizan la estrecha similitud entre éstas y las soldaduras.

Inclusiones sólidas Las inclusiones sólidas son materiales sólidos no metálicos atrapados en el metal de soldadura. La forma más común son las inclusiones de escoria generadas durante los diferentes procesos de soldadura con arco que usan fundente. En lugar de flotar

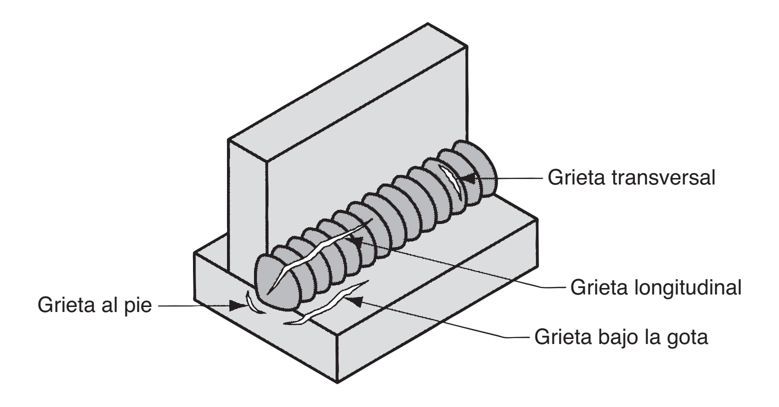


FIGURA 31.31 Diferentes formas de grieta en una soldadura.

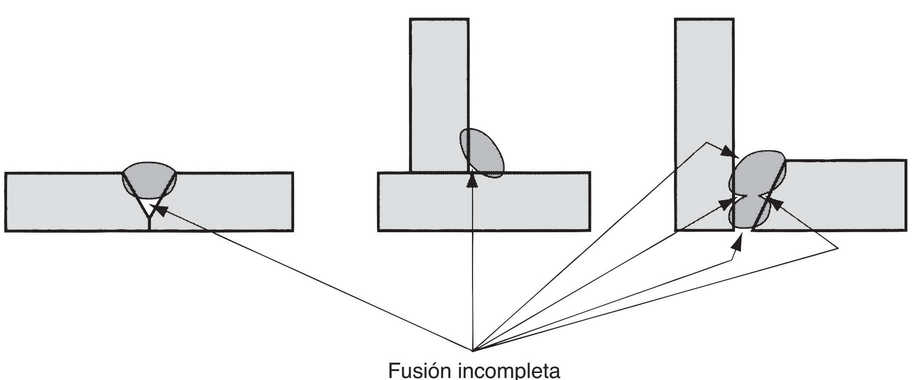


FIGURA 31.32 Varias formas de fusión incompleta.

hacia la parte superior del pozo de soldadura, las gotas de escoria quedan atrapadas durante la solidificación del metal. Otra forma de inclusión son los óxidos metálicos que se forman durante la soldadura de ciertos metales como el aluminio, los cuales normalmente tienen un recubrimiento superficial de Al_2O_3.

Fusión incompleta En la figura 31.32 se ilustran varias formas de este defecto. También conocido como ***falta de fusión,*** es simplemente una gota de soldadura en la cual no ocurre la fusión a través de toda la sección transversal de la unión. Un defecto relacionado pero diferente es la falta de penetración. El término ***penetración*** hace referencia a la profundidad que alcanza la soldadura dentro del metal base de la unión. Una ***falta de penetración*** significa que la fusión no penetró lo suficiente en la raíz de la unión, en relación con los estándares especificados.

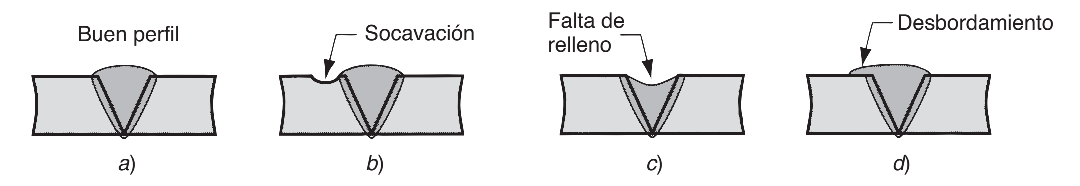
Forma imperfecta o perfil inaceptable La soldadura debe tener cierto perfil deseado para una máxima resistencia, como se indica en la figura 31.33a para una soldadura única con surco en V. Este perfil de soldadura maximiza la resistencia de la unión soldada y evita la fusión incompleta y la falta de penetración. Algunos de los defectos comunes en la forma y el perfil de la soldadura se ilustran en la figura 31.33.

Defectos diversos En la categoría de diversos están los ***golpes de arco***, en los cuales el soldador accidentalmente permite que el electrodo toque el metal base junto a la unión, dejando una cicatriz en la pieza; la ***salpicadura excesiva***, en la cual caen gotas del metal de soldadura fundido sobre la superficie de las piezas base; y otros defectos no incluidos en las categorías anteriores.

31.6.3 Métodos de inspección y prueba

Existen diversos métodos de inspección y prueba disponibles para verificar la calidad de la unión soldada. Durante años se han creado y especificado diversos procedimientos estandarizados por sociedades comerciales y de ingeniería como la American Welding Society

FIGURA 31.33 *a*) Perfil de soldadura deseado para una unión soldada única con surco en V. La misma unión, pero con varios defectos de soldadura; *b*) ***socavación***, donde una porción de la pieza de metal base se ha fundido; *c*) ***falta de relleno***, una depresión en la soldadura bajo el nivel de la superficie metálica base adyacente y *d*) ***desbordamiento***, en la cual el metal de soldadura se derrama más allá de la unión sobre la superficie de la parte pieza, pero no ocurre fusión.



(AWS). Para propósitos de análisis, estos procedimientos de inspección y prueba se dividen en tres categorías: 1) visuales, 2) no destructivos y 3) destructivos.

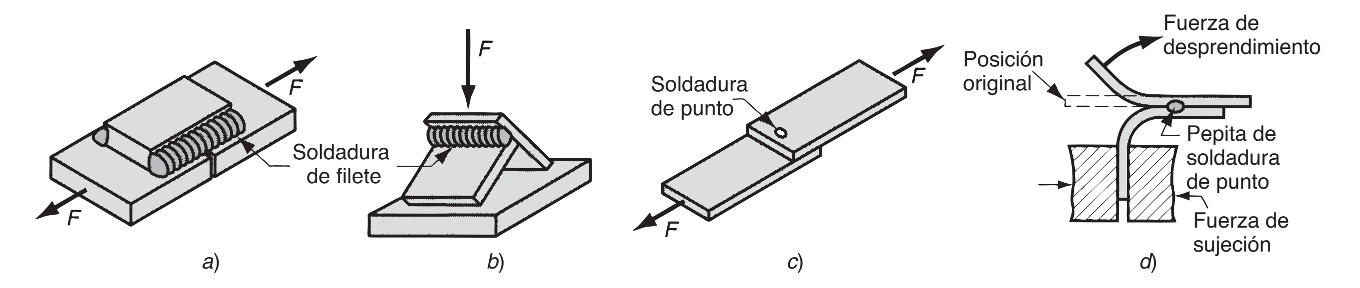
Inspección visual Sin duda la inspección visual es el método de verificación de soldadura más difundido. La realiza un inspector que busca en la soldadura: 1) el apego a las especificaciones de dimensión en el dibujo de la pieza; 2) combaduras y 3) grietas, cavidades, fusión incompleta y otros defectos descritos en la sección anterior. El inspector de soldadura también determina si se requieren pruebas adicionales, por lo general en la categoría no destructiva. La inspección visual tiene la limitación de que sólo detecta los defectos superficiales; los defectos internos no pueden descubrirse mediante métodos visuales.

Evaluación no destructiva El grupo de la inspección no destructiva incluye diversos métodos de inspección que no dañan la pieza que se evalúa. Las ***pruebas de tinturas penetrantes*** y ***penetrantes fluorescentes*** son métodos para detectar pequeños defectos como grietas y cavidades abiertas en la superficie. Los líquidos penetrantes fluorescentes son muy visibles cuando se exponen a la luz ultravioleta. Por lo tanto, su uso es una técnica más sensible que la de contraste.

La ***prueba de partículas magnéticas*** se limita a los materiales ferromagnéticos. Se establece un campo magnético en la pieza y se dispersan partículas magnéticas (por ejemplo, limadura de hierro) sobre la superficie. Los defectos bajo la superficie tales como grietas e inclusiones se revelan a sí mismos por la distorsión del campo magnético, lo que provoca que las partículas se concentren en ciertas regiones de la superficie. La ***prueba ultrasónica*** implica el uso de ondas sónicas de alta frecuencia (de más de 20 kHz) dirigidas a través de la pieza. Las discontinuidades (por ejemplo, grietas, inclusiones y porosidad) se detectan mediante pérdidas en la transmisión del sonido. La ***prueba radiográfica*** usa rayos X o radiación gamma para detectar defectos internos en el metal de la soldadura; este procedimiento proporciona un registro con película fotográfica de cualquier defecto encontrado.

Pruebas destructivas En estos métodos se destruye la soldadura durante la prueba o al preparar el espécimen de prueba. Incluyen pruebas mecánicas y metalúrgicas. Las ***pruebas mecánicas*** tienen el mismo propósito que los métodos de prueba convencionales, como pruebas de tensión y pruebas de corte (capítulo 3). La diferencia es que el espécimen de prueba es una unión soldada. En la figura 31.34 se presenta una muestra de las pruebas mecánicas utilizadas en la soldadura. Las ***pruebas metalúrgicas*** implican la preparación de especimenes metalúrgicos de la soldadura, para examinar características como la estructura metálica, defectos, alcance y condición de la zona afectada por el calor, la presencia de otros elementos y fenómenos similares.

FIGURA 31.34 Las pruebas mecánicas usadas en la soldadura: *a*) prueba de tensión y corte en la soldadura con arco, *b*) prueba de rompimiento de filete, *c*) prueba de tensión y corte en la soldadura de punto y *d*) prueba de desprendimiento en la soldadura de puntos.



31.7 SOLDABILIDAD

La ***soldabilidad*** se define como la capacidad de un metal o combinación de metales para soldarse en una estructura diseñada de modo conveniente, y para que la(s) unión(es) soldada(s) posea(n) las propiedades metalúrgicas requeridas y realice(n) satisfactoriamente el servicio requerido. La buena soldabilidad se caracteriza por la facilidad con que se realiza el proceso de soldadura, la ausencia de defectos de soldadura y con resistencia, ductilidad y tenacidad aceptables en la unión soldada.

Los factores que afectan la soldabilidad son: 1) el proceso de soldadura, 2) las propiedades del metal base, 3) el metal de relleno y 4) las condiciones de la superficie. El proceso de soldadura es significativo. Algunos metales o combinaciones de metales que se sueldan con facilidad mediante un proceso son difíciles de soldar con otros. Por ejemplo, el acero inoxidable se suelda fácilmente mediante la mayoría de los procesos de AW, pero se considera un metal difícil para los procesos de soldadura con oxígeno y gas combustible.

Las propiedades del metal base afectan el rendimiento de la soldadura. Las propiedades importantes incluyen el punto de fusión, la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica. Podría pensarse que un punto de fusión más bajo significaría una soldadura más fácil. Sin embargo, algunos metales se funden con demasiada facilidad para una buena soldadura (por ejemplo, el aluminio). Los metales con alta conductividad térmica tienden a transferir calor lejos de la zona de soldadura, lo cual puede hacerlos difíciles de soldar (por ejemplo, el cobre). La alta expansión térmica y la contracción en el metal provocan problemas de distorsión en el ensamble soldado.

Los metales distintos poseen problemas especiales en la soldadura cuando sus propiedades físicas o mecánicas son sustancialmente diferentes. Las diferencias en la temperatura de fusión significan un problema obvio. Las diferencias en la resistencia o el coeficiente de expansión térmica pueden provocar altas tensiones residuales que conducen a grietas. Si se usa un metal de relleno, éste debe ser compatible con el(los) metal(es) base. En general, los elementos mezclados en estado líquido que forman una solución sólida tras la solidificación no provocarán problemas. Puede darse fragilidad en la unión soldada si se exceden los límites de solubilidad.

Las condiciones superficiales de los metales base pueden afectar adversamente la operación. Por ejemplo, la humedad puede provocar porosidad en la zona de fusión. Los óxidos y otras películas sólidas en las superficies metálicas evitan un contacto adecuado e impiden la fusión.

31.8 CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN LA SOLDADURA

Si se va a soldar un ensamble de manera permanentemente, el diseñador debe recordar ciertas directrices (recopiladas de Bralla [1], Cary [2] y otras fuentes):

- ***Diseño para la soldadura***. La recomendación básica es que el producto debe diseñarse desde el principio como un ensamble soldado y no como una fundición, un forjado u otra pieza formada.
- ***Piezas mínimas***. Los ensambles soldados deben consistir en la menor cantidad de piezas posibles. Por ejemplo, generalmente es más eficiente en costos realizar operaciones de doblado simple sobre una pieza, que soldar un ensamble a partir de placas y láminas planas.

Las directrices siguientes se aplican a la soldadura con arco:

- Es importante ***ajustar las piezas*** que se van a soldar, para mantener el control de las dimensiones y minimizar la distorsión. En ocasiones se requiere aplicar un maquinado para obtener un ajuste satisfactorio.
- El ensamble debe proporcionar un espacio accesible con el fin de permitir que la pistola de soldadura alcance el área de trabajo.

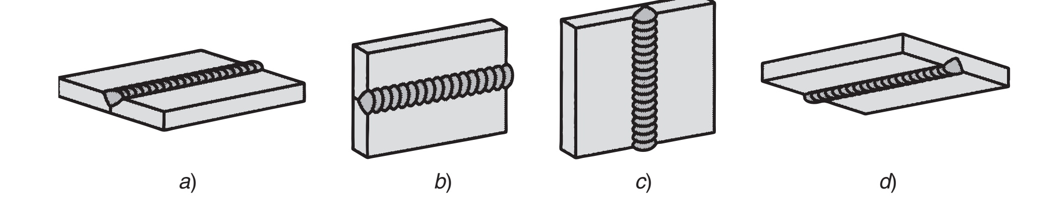


FIGURA 31.35 Posiciones para soldadura (definidas aquí para soldaduras con surco): *a*) plana, *b*) horizontal, *c*) vertical y *d*) sobre la cabeza.

- Cuando sea posible, el diseño del ensamble debe permitir que se realice una ***soldadura plana***, dado que ésta es la posición de trabajo más conveniente y más rápida. Las posiciones posibles para soldadura se definen en la figura 31.35. La posición sobre la cabeza es la más difícil.

Las siguientes directrices de diseño se aplican para la soldadura de puntos por resistencia:

- La lámina de acero al bajo carbono de hasta 3.2 mm (0.125 in) es el metal ideal para la soldadura de puntos por resistencia.
- Puede obtenerse resistencia y rigidez adicional en componentes de lámina metálica plana: 1) al colocar en éstas piezas de refuerzo con soldadura de puntos o 2) al formar rebordes y relieves en dichos componentes.
- El ensamble soldado con puntos debe proporcionar acceso para que los electrodos alcancen el área de soldadura.
- Se requiere una superposición suficiente de las piezas de lámina metálica para que la punta del electrodo haga un contacto adecuado en la soldadura de puntos. Por ejemplo, para la lámina de acero al bajo carbono, la distancia de superposición debe variar aproximadamente seis veces el espesor de la materia prima para láminas con un espesor de 3.2 mm (0.125 in), y alrededor de 20 veces el espesor para láminas delgadas de 0.5 mm (0.020 in).

REFERENCIAS

[1] Bralla, J. G., (editor en jefe), ***Design for Manufacturability Handbook,*** 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.
[2] Cary. H. B. y Helzer S. C., ***Modern Welding Technology,*** 6a. ed. Pearson/Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. J., 2005.
[3] Galyen, J., Sear. G. y Tuttle, C. A., ***Welding, Fundamentals and Procedures,*** 2a. ed. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River. N. J., 1991.
[4] Messler, R. W., Jr., ***Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy,*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1999.
[5] ***Metals Handbook,*** 9a. ed., vol. 6. ***Welding, Brazing, and Soldering,*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio. 1983.
[6] Rich. T. y Roberts. R., "The Forge Phase of Friction Welding", ***Welding Journal,*** marzo de 1971.
[7] Stout, R. D. y Ott. C. D., ***Weldability of Steels***, 4a. ed. Welding Research Council, Nueva York, 1987.
[8] ***Welding Handbook,*** 8a. ed., vol. 1. ***Welding Technology.*** American Welding Society, Miami, Fl., 1987.
[9] ***Welding Handbook,*** 8a. ed., vol. 2. ***Welding Processes***. American Welding Society, Miami, Fl., 1991.
[10] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., vol. IV. ***Quality Control and Assembly,*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich. 1987.

PREGUNTAS DE REPASO

31.1. Mencione los grupos principales de los procesos incluidos en la soldadura por fusión.

31.2. ¿Cuál es la característica fundamental que distingue la soldadura por fusión de la soldadura de estado sólido?

31.3. Defina qué es un arco eléctrico.

31.4. ¿Qué significan los términos tiempo con el arco encendido y tiempo de arco?

31.5. Los electrodos en la soldadura con arco se dividen en dos categorías. Mencione y defina los dos tipos.

31.6. ¿Cuáles son los dos métodos básicos para proteger el arco?

31.7. ¿Por qué es mayor el factor de transferencia de calor en los procesos de soldadura con arco que utilizan electrodos consumibles que aquellos que usan electrodos no consumibles?
31.8. Describa el proceso de soldadura con arco de metal protegido (SMAW).
31.9. ¿Por qué es difícil de automatizar el proceso de soldadura con arco de metal protegido (SMAW)?
31.10. Describa la soldadura con arco sumergido (SAW).
31.11. ¿Por qué son mucho más altas las temperaturas en la soldadura por arco de plasma que en otros procesos de AW?
31.12. Defina soldadura por resistencia.
31.13. ¿Cuáles son las propiedades deseables para que un metal proporcione buena soldabilidad para la soldadura por resistencia?
31.14. Describa la secuencia de pasos en el ciclo de una operación de soldadura de puntos por resistencia.
31.15. ¿Qué es una soldadura de proyección por resistencia?
31.16. Describa la soldadura de alambre transversal.
31.17. ¿Por qué se prefiere el proceso de soldadura con oxiacetileno sobre los otros procesos de soldadura con oxígeno y gas combustible?
31.18. Defina soldadura por gas a presión.
31.19. La soldadura con haz de electrones tiene una desventaja importante en las aplicaciones de alta producción. ¿Cuál es esa desventaja?
31.20. La soldadura con haz láser y la soldadura con haz de electrones se comparan con frecuencia debido a que ambas producen densidades de potencia muy altas. La LBW tiene ciertas ventajas sobre la EBW. ¿Cuáles son estas ventajas?
31.21. En la actualidad, existen varias diferencias entre la soldadura por forjado y el proceso de soldadura original. Mencione estas diferencias.
31.22. Describa y distinga los dos tipos básicos de soldadura por fricción.
31.23. ¿Qué es un sonotrodo en la soldadura ultrasónica?
31.24. La deformación (combadura) es un problema serio en la soldadura por fusión, en particular de la soldadura con arco. ¿Cuáles son algunas de las medidas que pueden tomarse para reducir la incidencia y el alcance de la deformación?
31.25. ¿Cuáles son algunos de los defectos importantes de la soldadura?
31.26. ¿Cuáles son las tres categorías básicas de técnica de inspección y prueba usadas para las soldaduras? Mencione algunas inspecciones o pruebas comunes en cada categoría,
31.27. ¿Cuáles son los factores que afectan la soldabilidad?
31.28. ¿Cuáles son algunas de las directrices de diseño para las soldaduras fabricadas mediante soldadura con arco?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 22 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

31.1. La característica que distingue los procesos de soldadura por fusión de la soldadura de estado sólido es que en la soldadura por fusión se funden las superficies de empalme: *a*) cierto o *b*) falso.
31.2. ¿Cuál de los siguientes procesos se clasifica como soldadura por fusión? (tres respuestas correctas): *a*) soldadura electrogaseosa, *b*) soldadura con haz de electrones, *c*) soldadura explosiva, *d*) soldadura de forjado, *e*) soldadura con láser y *f*) soldadura ultrasónica?
31.3. ¿Cuál de los siguientes procesos se clasifica como soldadura por fusión? (dos respuestas correctas): *a*) soldadura por difusión, *b*) soldadura por fricción, *c*) soldadura con gas a fricción, *d*) soldadura por resistencia y *e*) soldadura con rodillos.
31.4. ¿Cuál de los siguientes procesos se clasifica como soldadura de estado sólido? (dos respuestas correctas): *a*) soldadura por difusión, *b*) soldadura de puntos por resistencia, *c*) soldadura con rodillos, *d*) soldadura con termita y *e*) soldadura con recalcado.
31.5. Un arco eléctrico es una descarga de corriente a través de una separación en un circuito eléctrico. El arco eléctrico se sostiene en los procesos de soldadura con arco mediante la transferencia de metal fundido a través de la separación entre el electrodo y el trabajo: *a*) cierto o *b*) falso.
31.6. ¿Cuál de los siguientes procesos de soldadura con arco usa un electrodo no consumible?: *a*) FCAW, *b*) GMAW, *c*) GTAW o *d*) SMAW.
31.7. La soldadura MIG es un término que se aplica en ocasiones cuando se hace referencia a cuál de los procesos siguientes: *a*) FCAW, *b*) GMAW, *c*) GTAW o *d*) SMAW.
31.8. La soldadura de "varilla" es un término que se aplica en ocasiones cuando se hace referencia a ¿cuál de los procesos siguientes?: *a*) FCAW, *b*) GMAW, *c*) GTAW, o *d*) SMAW.
31.9. ¿Cuál de los siguientes procesos de AW usa un electrodo que consiste en una tubería consumible continua que contiene fundente y otros ingredientes en su núcleo?: *a*) FCAW, *b*) GMAW, *c*) GTAW o *d*) SMAW.
31.10. ¿Cuál de los siguientes procesos de soldadura con arco produce las temperaturas más altas?: *a*) CAW, *b*) PAW, *c*) SAW, o *d*) TIG.
31.11. Los procesos de soldadura por resistencia usan el calor generado mediante una resistencia eléctrica para obtener la fusión de las dos piezas que se van a unir; no se usa presión en estos procesos y no se añade metal de relleno: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

31.12. Los metales más fáciles de soldar en la soldadura por resistencia son aquellos que tienen bajas resistividades, puesto que eso ayuda al flujo de la corriente eléctrica: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

31.13. La soldadura con oxiacetileno es el proceso de soldadura con oxígeno y gas combustible de mayor uso, debido a que el acetileno mezclado con un volumen igual de aire arde a una temperatura más alta que cualquier otro combustible de uso comercial: ¿*a*) cierto, o *b*) falso?

31.14. El término "láser" significa "sistema conducido por luz para una reflexión efectiva (*light actuated system for effective reflection*)": ¿*a*) cierto o *b*) falso?

31.15. ¿Cuál de los siguientes procesos de soldadura de estado sólido aplica calor desde una fuente externa? (dos respuestas mejores): *a*) soldadura por difusión, *b*) soldadura por forjado, *c*) soldadura por fricción y *d*) soldadura ultrasónica.

31.16. El término soldabilidad toma en cuenta no sólo la facilidad con que se puede ejecutar una operación de soldadura, sino también la calidad de la soldadura resultante: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

31.17. El cobre es un metal relativamente fácil de fundir debido a que tiene una alta conductividad térmica: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

PROBLEMAS

Soldadura con arco

31.1. Una operación de SMAW se realiza en una sección del trabajo usando un ajustador y un soldador. El ajustador ocupa 5.5 minutos para colocar sus componentes sin soldar en el soporte para soldadura al inicio del ciclo de trabajo, y 2.5 min para descargar la soldadura terminada al final del ciclo. La longitud total de las costuras de soldadura que se van a hacer es de 2 000 mm y la velocidad de la carrera que usa el soldador tiene un promedio de 400 mm/min. Cada 750 mm de longitud de soldadura, debe cambiarse la varilla de soldadura, lo que requiere de 0.8 min. Mientras el ajustador está trabajando, el soldador descansa; y mientras el soldador trabaja, el ajustador está inactivo. *a*) Determine el tiempo de arco promedio en este ciclo de soldadura. *b*) ¿Cuánta mejora se produciría en el tiempo de arco si el soldador usara FCAW (operada en forma manual), dado que el carrete de alambre para soldadura con núcleo de fundente debe cambiarse cada cinco operaciones y esta actividad ocupa 5.0 min? *c*) ¿Cuáles son las velocidades de producción para estos dos casos (soldaduras terminadas por hora)?

31.2. En el problema anterior, suponga que se instalará una celda con robot industrial para sustituir al soldador. La célula consistiría en el robot (usando GMAW en lugar de SMAW o FCAW), dos soportes para soldadura y el ajustador que carga y descarga las piezas. Con dos soportes, el ajustador y el robot trabajan simultáneamente, el robot suelda en un soporte mientras el ajustador descarga y carga el otro. Al final de cada ciclo de trabajo, cambian lugares. El carrete de alambre de electrodo debe cambiarse cada cinco piezas de trabajo, tarea que requiere 5.0 minutos y que realiza el ajustador. Determine *a*) el tiempo de arco y *b*) la velocidad de producción para esta celda de trabajo.

31.3. Se realiza una operación de soldadura con arco protegido sobre acero; se usa un voltaje de 30 volts y una corriente de 225 amperes. El factor de transferencia de calor es de 0.85 y el factor de fusión es de 0.75. La energía de fusión unitaria para el acero es de 10.2 J/mm^3. Obtenga *a*) la tasa de generación de calor en la soldadura y *b*) el flujo volumétrico de metal soldado.

31.4. Se realiza una operación de GTAW sobre acero al bajo carbono, cuya energía de fusión unitaria es de 10.3 J/mm^3. El voltaje es de 22 volts y la corriente es de 135 amperes. El factor de transferencia de calor es de 0.85 y el factor de fusión es de 0.65. Si se añade un alambre de metal de relleno de 3.5 mm de diámetro a la operación, el volumen final de la gota de soldadura estará compuesta de 60% de metal de relleno y 40% de metal base. Si la velocidad de la carrera en la operación es de 5 mm/s, determine *a*) el área de sección transversal de la gota de soldadura y *b*) la velocidad de alimentación (en mm/s) a la que debe suministrarse el alambre de relleno.

31.5. Se ejecuta una operación de soldadura con arco de núcleo fundente para empalmar dos placas de acero inoxidable austenítico. El voltaje de soldadura es de 21 volts y la corriente es de 185 amperes. Se supone que el área de sección transversal de la costura de soldadura es de 75 mm^2 y que el factor de fusión del acero inoxidable es de 0.60. Usando los datos tabulares y las ecuaciones proporcionadas en este capítulo y el anterior, determine el valor probable para la velocidad de la carrera v en la operación.

31.6 Se emplea un proceso de soldadura con arco de núcleo fundente para unir dos placas de aleación baja de acero a un ángulo de 90°, usando una soldadura de filete externo. Las placas de acero tienen un espesor de 1/2 in. La gota de soldadura consiste en 55% de metal del electrodo y 45% restante proviene de las placas. El factor de fusión del acero es de 0.65 y el factor de transferencia de calor es de 0.80. Se usa una corriente de soldadura de 75 amperes y un voltaje de 16 volts. La velocidad de la cabeza soldadora es de 40 in/min. El diámetro del electrodo es de 0.10 in. Hay un núcleo de fundente a través del centro del electrodo, el cual tiene un diámetro de 0.05 in y contiene fundente (compuestos que no se vuelven parte de la gota de soldadura). *a*) ¿Cuál es el área de la sección transversal de la gota de soldadura? *b*) ¿A qué velocidad debe alimentarse el electrodo en la pieza de trabajo?

31.7. Se ejecuta una operación de soldadura con arco de metal y gas para determinar el valor del factor de fusión f_2 en un metal y una operación determinados. El voltaje de soldadura es de 25 volts, la corriente es de 125 amperes, y se supone que el factor de transferencia de calor es de 0.90, un valor típico para la GMAW. La velocidad a la que se añade el metal de

relleno a la soldadura es de 0.50 in^3 por minuto, y las medidas indican que las gotas de soldadura finales consisten en 57% de metal de relleno y 43% de metal base. Se sabe que la energía de fusión unitaria para el metal es de 75 Btu/in^3. *a*) Encuentre el factor de fusión, *b*) ¿Cuál es la velocidad de la carrera si el área de sección transversal de la gota de soldadura es de 0.05 in^2?

31.8. Se realizará una soldadura continua alrededor de la circunferencia de un tubo de acero redondo con un diámetro de 6.0 ft, usando una operación de soldadura con arco sumergido bajo control automático en un voltaje de 25 volts y una corriente de 300 amperes. Se hace rotar suavemente el tubo bajo una cabeza de soldadura estacionaria. El factor de transferencia de calor para la SAW es de 0.95 y se supone un factor de fusión de 0.7. El área de sección transversal de la gota de soldadura es de 0.12 in^2. Si la energía de fusión unitaria para el acero es de 150 Btu/in^3, determine *a*) la velocidad de rotación del tubo y *b*) el tiempo requerido para completar la soldadura.

Soldadura por resistencia

31.9. Se ejecuta una operación de RSW para hacer una serie de soldaduras de punto entre dos piezas de aluminio, cada una con un espesor de 2.0 mm. La energía de fusión unitaria para el aluminio es de 2.90 J/mm^3**.** La corriente de soldadura es de 6 000 amperes y una duración es de 0.15 s. Suponga que la resistencia es de 75 microohms. La pepita de soldadura resultante mide 5.0 mm de diámetro por 2.5 mm de espesor. ¿Cuánto de la energía total generada se usó para formar la pepita de soldadura?

31.10. Se usa una operación de RSW para unir dos piezas de lámina de acero, el cual tiene una energía de fusión unitaria de 130 Btu/in^3. La lámina de acero tiene un espesor de 1/8 in. La duración del proceso se establecerá en 0.25 s, con una corriente de 11 000 amperes. Con base en el diámetro del electrodo, la pepita de soldadura tendrá un diámetro de 0.30 in. La experiencia ha mostrado que 50% del calor suministrado funde la pepita y el resto es disipado por el metal. Si la resistencia eléctrica entre las superficies es de 130 microohms, ¿cuál es el espesor de la pepita de soldadura si se supone que tiene un espesor uniforme?

31.11. La energía de fusión unitaria para cierta lámina metálica que se va a soldar con puntos es de 9.5 J/mm^3. El espesor de cada una de las láminas que se van soldar es de 3.5 mm. Para obtener la resistencia requerida, se desea formar una pepita de soldadura con un diámetro de 5.5 mm y un espesor de 5.0 mm. La duración de la soldadura se establecerá en 0.3 s. Si se supone que la resistencia eléctrica entre las superficies es de 140 microohms, y que sólo un tercio de la energía eléctrica generada se usará para formar la pepita de soldadura (y el resto se disipará en el trabajo), determine el nivel de corriente mínimo requerido para esta operación.

31.12 Se realiza una operación de soldadura de puntos sobre dos piezas de lámina de acero (al bajo carbono) de 0.040 in de espesor. La energía de fusión unitaria para el acero es de 9 500 A y la duración es de 0.17 s. Lo anterior da por resultado una pepita de soldadura con un diámetro de 0.19 in y un espesor de 0.060 in. Suponga una resistencia de 100 microohms. Determine *a*) la densidad de potencia promedio en el área de interfaz definida por la pepita de soldadura y *b*) la proporción de la energía generada que va a la formación de la pepita de soldadura.

31.13. Se realiza una operación de soldadura de costura por resistencia sobre dos piezas de acero inoxidable austenítico de 2.5 mm de espesor para fabricar un contenedor. La corriente de soldadura en la operación es de 10 000 amperes, la duración de la soldadura es de 0.3 s, y la resistencia en la interfaz es de 75 microohms. Se usa soldadura de movimiento continuo, con ruedas de electrodo de 200 mm de diámetro. Las pepitas de soldadura individuales formadas en esta operación de RSEW tienen un diámetro de 6 mm y un espesor de 3 mm (suponga que las pepitas de soldadura tienen forma de discos). Estas pepitas de soldadura deben estar contiguas para formar una costura sellada. La unidad de energía que conduce el proceso requiere un tiempo de descanso entre soldaduras de puntos de 1.0 s. Dadas estas condiciones, determine: *a*) la energía de fusión unitaria del acero inoxidable usando los métodos del capítulo anterior, *b*) la proporción de la energía generada que participa en la formación de cada pepita de soldadura y *c*) la velocidad de rotación de las ruedas del electrodo.

31.14. Suponga que en el problema anterior se realiza una operación de soldadura de puntos con rodillos en lugar de una soldadura de costura. Las resistencias de interfaz aumentan a 100 microohms y la separación de centro a centro entre las pepitas de soldadura es de 25 mm. Dadas las condiciones del problema previo, y con los cambios señalados aquí, determine *a*) la proporción de la energía generada que participa en la formación de cada pepita de soldadura y *b*) la velocidad de rotación de las ruedas de electrodos. *c*) A esta velocidad de rotación más alta, ¿cuánto se mueve la rueda durante la corriente a tiempo y esto podría tener el efecto de alargar la pepita de soldadura (haciéndola elíptica en lugar de redonda)?

31.15. Se utiliza soldadura de proyección por resistencia para soldar de manera simultánea dos placas delgadas de acero en cuatro ubicaciones. Una de las piezas de placa de acero tiene un diámetro de 0.25 in y una altura de 0.20 in. La duración del flujo de corriente durante la soldadura es de 0.30 s y las cuatro proyecciones se sueldan en forma simultánea. La placa de acero tiene una energía de fusión unitaria de 140 Btu/in^3 y una resistencia entre las placas de 90.0 microohms. La experiencia ha mostrado que 55% del calor es disipado por el metal y 45% funde la pepita de soldadura. Suponga que el volumen de las pepitas será dos veces el volumen de las proyecciones, dado que se funde metal de las dos piezas. ¿Cuánta corriente se requiere para el proceso?

31.16. Se diseña una fuente de energía experimental para soldadura de puntos que entrega corriente como una función de elevación de tiempo: $I = 100\,000\,t$, donde I = amperes y t = s. Al final del tiempo con la energía encendida, la corriente se detiene abruptamente. La lámina de metal que se suelda con puntos es de acero al bajo carbono cuya energía de fusión unitaria es de 10 J/mm^3. La resistencia R es de 85 microohms. La pepita de soldadura deseada tiene un diámetro de 4 mm y un espesor de 2 mm (suponga una pepita en forma de disco). Se supone que se usará 1/4 de la energía generada por la fuente para formar la pepita de soldadura. Determine el tiempo con la energía encendida en que debe aplicarse la corriente para realizar esta operación de soldadura de puntos.

Soldadura con oxígeno y gas combustible

31.17. En el ejemplo 31.3 del texto, suponga que el combustible usado en la operación de soldadura es MAPP en lugar de acetileno y que la proporción de calor concentrado en el círculo de 9 mm es de 60% en lugar de 75%. Calcule *a*) la velocidad del calor liberado durante la combustión, *b*) la tasa del calor transferido a la superficie de trabajo y *c*) la densidad de potencia promedio en el área circular.

31.18. Una parrilla de jardín que usa propano está diseñada para proporcionar 45 000 Btu usando tres quemadores. Usted decide ahorrar dinero y, en lugar de conectarla al tanque de propano, lo hace a la línea que suministra gas natural a su casa. Utiliza el mismo regulador del tanque de propano (mantiene la misma presión de salida). *a*) Con base en la tabla 31.2, ¿qué cantidad de calor puede esperarse de la parrilla? *b*) Para lograr 45 000 Btu, usted tendrá que cambiar las boquillas, que a su vez cambiarán el gasto de gas hacia los quemadores. ¿Deberán las boquillas para gas natural permitir más o menos flujo? *c*) ¿Cuánto gas natural tendrá que fluir (como un porcentaje del propano) para alcanzar el nivel de 45 000 Btu en la parrilla?

31.19. Un soplete de oxiacetileno suministra 8.5 ft^3 de acetileno por hora y un flujo volumétrico igual de oxígeno para una operación de OAW sobre acero de 1/4 in. El calor generado por la combustión se transfiere a la superficie de trabajo con un factor de transferencia de calor de 0.3. Si 80% del calor de la flama se concentra en un área circular sobre la superficie de trabajo cuyo diámetro es de 0.40 in, encuentre: *a*) la velocidad del calor liberado durante la combustión, *b*) la tasa del calor transferido a la superficie de trabajo y *c*) la densidad de potencia promedio en el área circular.

Soldadura con haz de electrones

31.20. El voltaje en una operación de EBW es de 45 kV y la corriente del haz es de 60 miliamperes. El haz de electrones se concentra sobre un área circular con un diámetro de 0.25 mm. El factor de transferencia de calor es de 0.87. Calcule la densidad de energía promedio en el área, en watts/mm^2.

31.21. Se va a realizar una operación de soldadura con haz de electrones para empalmar dos láminas metálicas con un espesor de 3.0 mm. La energía de fusión unitaria es de 5.0 J/mm^3. La unión soldada debe tener una anchura de 0.35 mm, por lo que la sección transversal del metal fundido es de 0.35 mm por 3.0 mm. Si el voltaje de aceleración es de 25 kV, la corriente del haz es de 30 miliamperes, el factor de transferencia de calor f_1 es de 0.85 y el factor de fusión f_2 es de 0.75; determine la velocidad de la carrera a la que puede hacerse esta soldadura a lo largo de la costura.

31.22. Se unirán dos piezas de placa de acero mediante una operación de soldadura con haz de electrones. Las placas tienen un espesor de 1.00 in. La energía de fusión unitaria es de 125 Btu/in^3. El diámetro del área de trabajo enfocada por el haz de electrones es de 0.060 in; por ende, el espesor de la soldadura será de 0.060 in. El voltaje de aceleración es de 30 kV y la corriente del haz es de 35 miliamperes. El factor de transferencia de calor es de 0.70 y el factor de fusión es de 0.55. Si el haz se mueve a una velocidad de 50 in/min, ¿penetrará este haz el espesor completo de las placas?

31.23. Una operación de soldadura con haz de electrones usa los siguientes parámetros de proceso: voltaje de aceleración de 25 kV, corriente del haz de 100 miliamperes, y el área circular en la que se concentra el haz tiene un diámetro de 0.020 in. Si el factor de transferencia de calor es de 90%, determine la densidad de potencia promedio en el área en Btu/s$-$in^2.

32

SOLDADURA DURA, SOLDADURA SUAVE Y PEGADO ADHESIVO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En este capítulo se consideran tres procesos de unión que son similares a la soldadura en ciertos aspectos: la soldadura dura o fuerte, la soldadura suave o blanda y las uniones adhesivas. La soldadura dura y la soldadura suave usan metales de aporte para juntar y unir dos (o más) piezas metálicas con el propósito de proporcionar una unión permanente. Es difícil, aunque no imposible, desensamblar las piezas después de que se ha hecho una unión con soldadura dura o suave. En el espectro de los procesos de unión, la soldadura dura y la soldadura suave se encuentran entre la soldadura por fusión y la soldadura de estado sólido. En ambas se agrega un metal de relleno, como en la mayoría de las operaciones de soldadura por fusión; sin embargo, no ocurre la fusión de los metales base, lo cual es similar a la soldadura de estado sólido. A pesar de estas anomalías, la soldadura dura y la soldadura suave generalmente se consideran distintas a la soldadura por fusión. La soldadura dura y la soldadura suave son atractivas en comparación con la soldadura por fusión bajo circunstancias donde 1) los metales tienen poca soldabilidad, 2) se unen metales distintos, 3) el intenso calor de la soldadura por fusión puede dañar alguno de los componentes que se van a unir, 4) la forma de la unión no se presta para ninguno de los métodos de soldadura por fusión o 5) no se requiere una resistencia alta.

El pegado adhesivo comparte ciertas características con la soldadura dura y la soldadura suave. Utiliza las fuerzas de unión entre un metal de relleno y dos superficies muy cercanas para pegar las piezas. Las diferencias son que el material de relleno en el pegado

adhesivo no es metálico y el proceso de unión se realiza a temperatura ambiente o sólo un poco por encima de ésta.

32.1 SOLDADURA DURA

La ***soldadura dura o fuerte*** es un proceso de unión en el cual se funde un metal de relleno y se distribuye mediante acción capilar entre las superficies de empalme de las piezas metálicas que se van a unir. En este tipo de soldadura no ocurre la fusión de los metales base; sólo se derrite el material de relleno. En este proceso, el metal de relleno (también llamado ***metal para soldadura dura***) tiene una temperatura de fusión (líquidus) superior a 450 °C (840 °F) pero menor que el punto de fusión (sólidus) de los metales base que se van a unir. Si la unión se diseña de manera adecuada y la operación de soldadura dura se ejecuta en forma apropiada, la unión con soldadura dura será más resistente que el metal de aporte del que se formó tras la solidificación. Este notable resultado se debe a los pequeños espacios entre las piezas que se usan en la soldadura dura, a la unión metalúrgica que ocurre entre el metal base y el metal de relleno y a las limitaciones geométricas que imponen las piezas base a la unión.

La soldadura dura tiene varias ventajas en comparación con la soldadura por fusión: 1) pueden unirse cualesquiera metales, incluso los que son distintos; 2) ciertos métodos de soldadura dura pueden realizarse en forma rápida y consistente, lo que permite altas velocidades de los ciclos y la producción automatizada; 3) algunos métodos permiten la soldadura simultánea de varias uniones; 4) la soldadura dura se aplica para unir piezas de paredes delgadas que no pueden soldarse por fusión; 5) en general, se requiere menos calor y potencia que en la soldadura por fusión; 6) se reducen los problemas en la zona afectada por el calor (HAZ) en el metal base cerca de la unión; y 7) es posible unir áreas inaccesibles para muchos procesos de soldadura por fusión, dado que la acción capilar atrae el metal de aporte fundido dentro de la unión.

Las desventajas y limitaciones de la soldadura dura son: 1) la resistencia de la unión por lo general es menor que una unión por fusión; 2) aunque la resistencia de una buena unión con soldadura dura es mayor que la del metal de aporte, es posible que sea menor que la de los metales base; 3) las altas temperaturas de uso pueden debilitar una unión con soldadura dura; y 4) el color del metal en una unión con soldadura dura puede no coincidir con el color de las piezas metálicas base, lo cual produce una posible desventaja estética.

La soldadura dura es un proceso de producción con uso extendido en diversas industrias, incluidas la automotriz (por ejemplo, para unir tubos y conductos), equipo eléctrico (por ejemplo, para unir alambres y cables), herramientas de corte (por ejemplo, para unir insertos de carburo cementado a flechas) y la fabricación de joyería; asimismo, la industria de procesamiento químico la usa. Además, los contratistas de plomería y calefacción unen conductos y tubos metálicos mediante soldadura dura. El proceso se usa de manera extensa para reparación y trabajos de mantenimiento en casi todas las industrias.

32.1.1 Uniones con soldadura dura

Las uniones con soldadura dura son de dos tipos: empalmadas y superpuestas (sección 30.2.1). Sin embargo, los dos tipos se han adaptado para el proceso de soldadura dura en varias formas. La unión empalmada convencional proporciona un área limitada para la soldadura dura, lo que pone en riesgo la resistencia de la unión. Para aumentar las áreas de empalme en las uniones con soldadura dura, las piezas que se van a juntar se biselan o escalonan o alteran de alguna manera, como se muestra en la figura 32.1. Por supuesto, generalmente se requiere un procesamiento adicional en la fabricación de las piezas para estas uniones especiales. Una dificultad particular asociada con una unión biselada es el problema de mantener la alineación de las piezas antes y durante la soldadura.

Las uniones superpuestas se usan con mayor frecuencia en la soldadura dura, porque proporcionan un área de interfaz relativamente grande entre las piezas. Por lo general, se con-

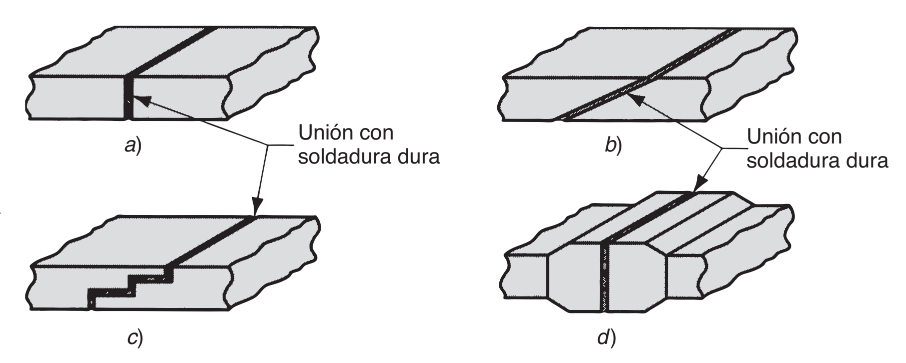


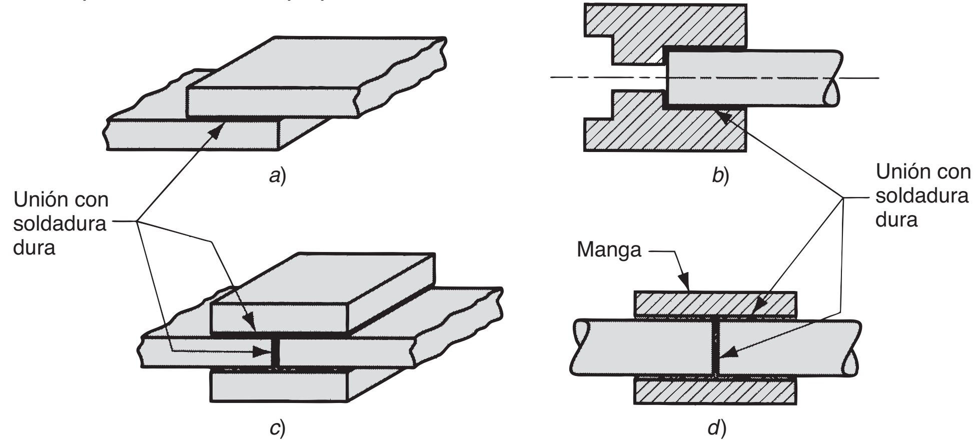
FIGURA 32.1 *a*) Unión empalmada convencional y adaptaciones de la unión empalmada para soldadura dura: *b*) unión con bisel, *c*) unión empalmada escalonada y *d*) sección transversal aumentada de la pieza en la unión.

sidera una buena práctica de diseño una superposición que tenga al menos tres veces el espesor de la pieza más delgada. Algunas adaptaciones de la unión superpuesta para la soldadura dura se ilustran en la figura 32.2. Una ventaja de la soldadura dura sobre la soldadura por fusión en las uniones superpuestas es que el metal de relleno se une a las piezas base en toda el área de interfaz entre las piezas, y no sólo en los bordes (como en las soldaduras de filete hechas con arco) o en puntos discretos (como en la soldadura de puntos por resistencia).

En la soldadura dura es importante la separación entre las superficies de las piezas base que se van a unir. La separación debe ser suficientemente grande para no limitar el flujo del metal de relleno fundido a través de toda la interfaz. También, si la separación en la unión es demasiado grande, la acción capilar se reducirá y habrá áreas entre las piezas donde no haya metal de relleno. La separación afecta la resistencia de la unión, como se muestra en la figura 32.3. Existe un valor de separación óptimo en el cual la resistencia de la unión se maximiza. Este aspecto se complica porque el valor óptimo depende de los metales base y de relleno, de la configuración de la unión y de las condiciones del procesamiento. En la práctica, las separaciones típicas para soldadura dura están entre 0.025 y 0.25 mm (0.001 y 0.010 in). Estos valores representan la separación de la unión a la temperatura en la que se lleva a cabo la soldadura dura, los cuales pueden ser diferentes de la separación a temperatura ambiente, dependiendo de la expansión térmica de los metales base.

También es importante la limpieza de las superficies de la unión antes de la soldadura dura. Las superficies deben estar libres de óxidos, aceites y otros contaminantes para promover la humidificación y la atracción capilar durante el proceso, así como la unión a través de toda la interfaz. Para limpiar las superficies se usan tratamientos químicos como la limpieza con solvente (sección 28.1) y los tratamientos mecánicos que incluyen el uso de cepillo de alambres y la limpieza con chorro de arena (sección 28.2). Después de la limpieza y durante la operación de soldadura dura se usan fundentes a fin de conservar la limpieza de la superficie y promover la humidificación para la acción capilar en la separación entre las superficies de empalme.

FIGURA 32.2 *a*) Unión superpuesta convencional y adaptación de la unión superpuesta para soldadura dura: *b*) piezas cilíndricas, *c*) piezas en forma de emparedado y *d*) uso de una manga para convertir una unión empalmada en unión superpuesta.



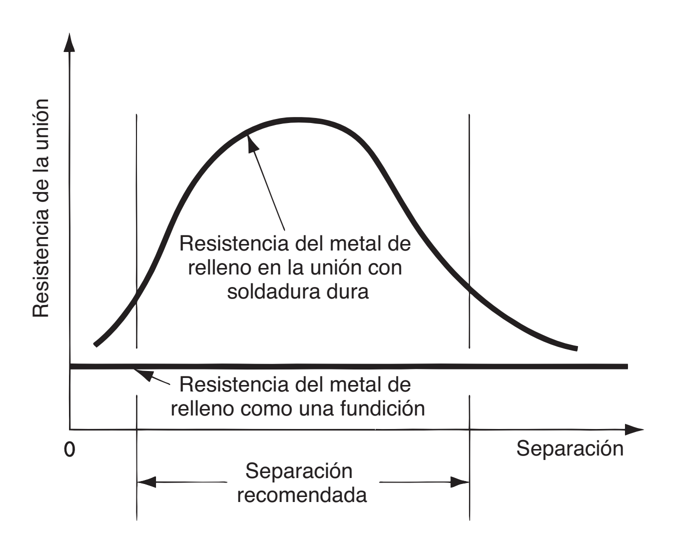


FIGURA 32.3 Resistencia de la unión como una función de la separación de la misma.

32.1.2 Metales de relleno y fundentes

Los ***metales de relleno*** comunes en la soldadura dura se enlistan en la tabla 32.1 junto con los metales base principales en los que se usan normalmente. Para que un metal califique para soldadura dura se requieren las siguientes características: 1) la temperatura de fusión debe ser compatible con la del metal base, 2) la tensión superficial en la fase líquida debe ser baja para una buena humidificación, 3) la fluidez del metal fundido debe ser alta para penetración en la interfaz, 4) el metal debe ser capaz de poder usarse en la soldadura dura con una unión de resistencia adecuada para la aplicación y 5) deben evitarse las interacciones químicas y físicas con el metal base (por ejemplo, una reacción galvánica). Los metales de relleno se aplican a la operación de soldadura dura en diversas formas, entre las que se incluyen alambres, varillas, láminas y tiras, polvos, pastas, piezas preformadas hechas de metal de latón diseñado para ajustarse a una configuración de unión particular y al revestimiento en una de las superficies a las que se va a aplicar soldadura dura. Varias de estas técnicas se ilustran en las figuras 32.4 y 32.5. Las pastas metálicas para soldadura dura, que se muestran en la figura 32.5, consisten en polvos metálicos de relleno mezclados con fundentes fluidos y aglutinantes.

Los ***fundentes para soldadura dura*** tienen el mismo propósito que en la soldadura por fusión; se disuelven, se combinan e inhiben de alguna forma la formación de óxidos y otros subproductos no deseados en el proceso. El uso de un fundente no sustituye los pasos de limpieza descritos con anterioridad. Las características de un buen fundente son: 1) una temperatura de fusión baja, 2) baja viscosidad para que pueda ser desplazado por el metal de relleno, 3) facilita la humidificación y 4) protege la unión hasta la solidificación del metal de aporte. El fundente también debe ser fácil de remover después de la soldadura dura.

TABLA 32.1 Metales de relleno comunes usados en la soldadura dura y metales base sobre los que se usan.

Metal de relleno	Composición típica	Temperatura aproximada para soldadura dura °C	°F	Metales base
Aluminio y silicio	90 Al, 10 Si	600	1 100	Aluminio
Cobre	99.9 Cu	1 120	2 050	Níquel cobre
Cobre y fósforo	95 Cu, 40 Zn	850	1 550	Cobre
Cobre y zinc	60 Cu, 40 Zn	925	1 700	Aceros, hierros fundidos, níquel
Oro y plata	80 Au, 20 Ag	950	1 750	Acero inoxidable, aleaciones de níquel
Aleaciones de níquel	Ni, Cr, otros	1 120	2 050	Acero inoxidable, aleaciones de níquel
Aleaciones de plata	Ag, Cu, Zn, Cd	730	1 350	Titanio, monel, inconel, acero para herramientas, níquel

Recopilado de [4] y [5].

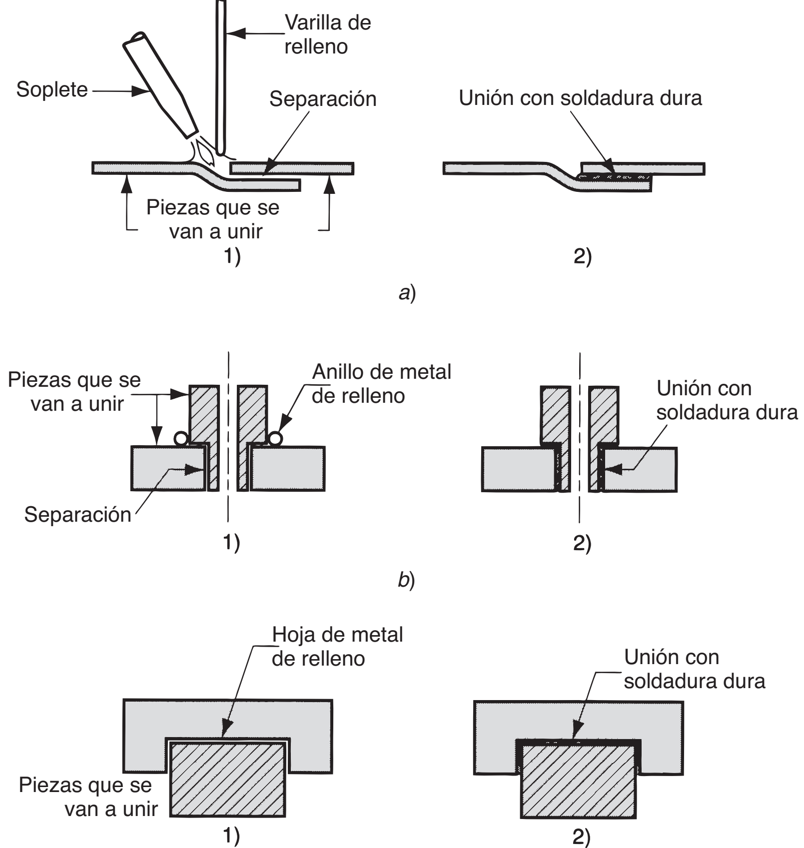


FIGURA 32.4 Varias técnicas para aplicar metal de relleno en la soldadura dura: *a*) soplete y varilla de metal de relleno, *b*) anillo de metal de relleno a la entrada de la separación y *c*) hoja de metal de relleno entre superficies de piezas planas. Secuencia: 1) antes y 2) después.

Los ingredientes comunes de fundentes para soldadura dura son el bórax, los boratos, los fluoruros y los cloruros. En la mezcla también se incluyen agentes de humidificación para reducir la tensión superficial del metal de relleno fundido y para mejorar la humidificación. Las distintas formas de fundente incluyen los polvos, las pastas y las pastas aguadas. Una alternativa para el uso de un fundente es ejecutar la operación en vacío o en una atmósfera que inhiba la formación de óxidos.

32.1.3 Métodos de soldadura dura

En la soldadura dura se usan diversos métodos denominados procesos para soldadura dura, y la diferencia entre ellos es su fuente de calentamiento.

Soldadura dura con soplete En la soldadura dura con soplete se aplica un fundente a las superficies de las piezas y se usa un soplete para dirigir una flama contra el trabajo en la vecindad de la unión. En forma típica se usa una flama reducida para inhibir la oxidación. Después de que las áreas para unión de la pieza de trabajo se calientan a una temperatura adecuada, se agrega metal de relleno a la unión, generalmente en forma de alambre o varilla. Los combustibles usados en la soldadura dura con soplete incluyen el acetileno, el propano y otros gases, junto con aire u oxígeno. La selección de la mezcla depende de los requerimientos de calentamiento del trabajo. Con frecuencia, el proceso de soldadura dura se realiza en forma manual y deben ejecutarlo trabajadores calificados para controlar la flama, manipular los sopletes manuales y juzgar adecuadamente las temperaturas; una aplicación común son los trabajos de reparación. El método también se usa en operaciones de producción mecanizada, en las cuales se cargan las piezas y el metal para soldadura dura en una banda transportadora o mesa indexada y se pasan bajo uno o más sopletes.

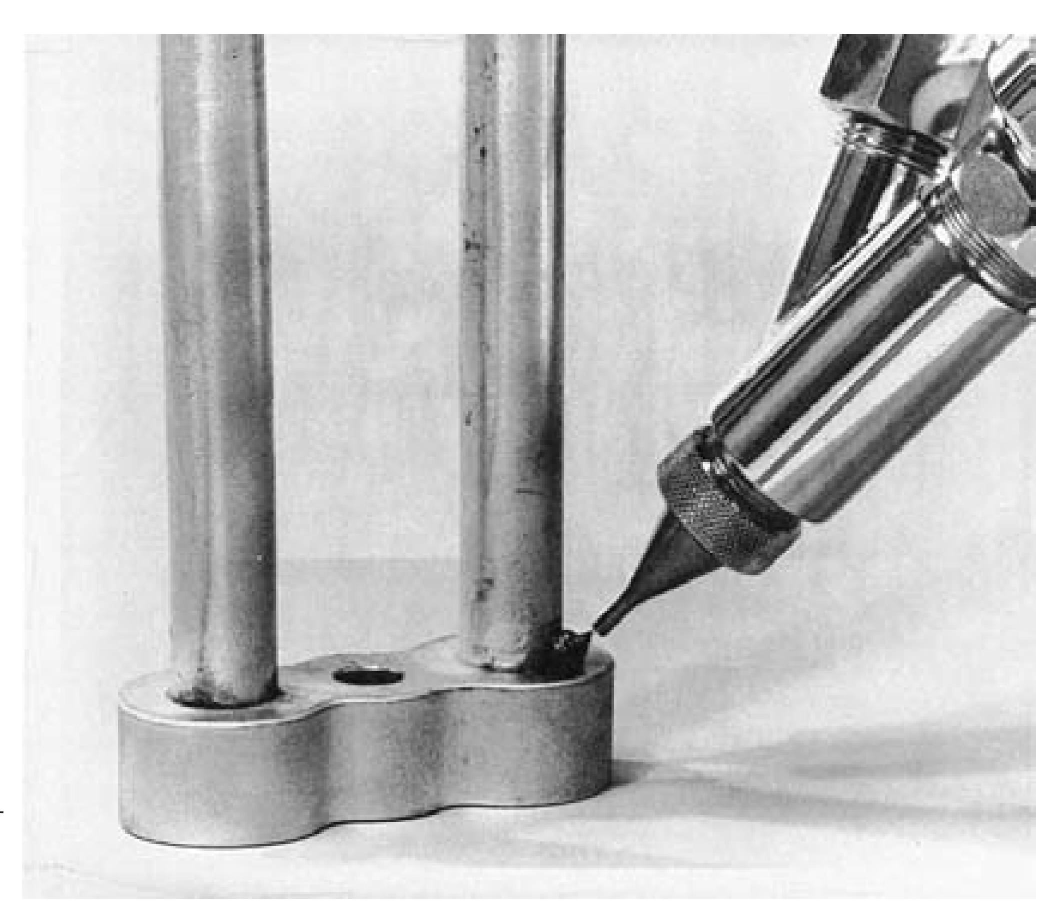


FIGURA 32.5 Aplicación de pasta para soldadura dura a una unión mediante dispensador. (Foto cortesía de Fusion, Inc.).

Soldadura dura en horno La soldadura dura en horno usa un horno para proporcionar calor a la soldadura dura y es más conveniente para la producción media y alta. En la producción media, por lo general en lotes, se cargan las piezas componentes y el metal para soldadura dura en el horno; éstas se calientan a temperaturas para soldadura y después se enfrían y retiran. Las operaciones de producción alta usan hornos de transporte, en los cuales se colocan las piezas en una banda transportadora y son conducidas a las diferentes secciones de calentamiento y enfriamiento. El control de la temperatura y la atmósfera es importante en la soldadura dura en horno; la atmósfera debe ser neutral o reductora. En ocasiones se usan hornos al vacío. Dependiendo de la atmósfera y los metales que se van a soldar, puede eliminarse la necesidad de un fundente.

Soldadura dura por inducción La soldadura dura por inducción utiliza calor de una resistencia eléctrica para una corriente de alta frecuencia inducida en el trabajo. Las piezas se cargan de manera previa con metal de relleno y se colocan en un campo de corriente alterna (ca) de alta frecuencia; las piezas no hacen contacto directamente con la bobina de inducción. Las frecuencias varían entre 5 kHz y 5 MHz. Las fuentes de potencia de alta frecuencia tienden a proporcionar calentamiento superficial, mientras que las frecuencias más bajas producen una penetración de calor más profunda en el trabajo y son convenientes para secciones más pesadas. El proceso se usa para requerimientos de baja a alta producción.

Soldadura dura por resistencia En este proceso, el calor para fundir el metal de relleno se obtiene mediante la resistencia al flujo de corriente eléctrica a través de las piezas. A diferencia de la soldadura dura por inducción, en la soldadura dura por resistencia las partes se conectan directamente al circuito eléctrico. El equipo es semejante al que se usa en la soldadura dura por resistencia, excepto porque en la soldadura dura se requiere un nivel de potencia más bajo. Las piezas con el metal de relleno aplicado en forma previa,

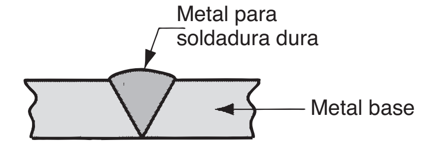


FIGURA 32.6 Soldadura dura. La unión consiste en metal (de relleno) para soldadura dura; no se funde el metal base en la unión.

se sostienen entre los electrodos mientras se aplica presión y corriente. Tanto la soldadura dura por inducción como por resistencia logran ciclos de calentamiento rápidos y se usan para piezas relativamente pequeñas. La soldadura dura por inducción parece ser el proceso de mayor uso entre estos dos procesos.

Soldadura dura por inmersión En la soldadura dura por inmersión, el calentamiento se consigue mediante un baño de sal fundida o un baño de metal fundido. En ambos métodos, las piezas ensambladas se sumergen en los baños dentro de un recipiente de calentamiento. La solidificación ocurre cuando las piezas se retiran del baño. En el ***método de baño de sal***, la mezcla fundida contiene ingredientes fundentes y el metal de relleno se carga previamente en el ensamble. En el ***método de baño metálico***, el metal de relleno fundido es el medio de calentamiento; se atrae hacia la unión mediante acción capilar durante la inmersión. Se mantiene una cubierta de fundente sobre la superficie del baño metálico fundido. Con la soldadura dura por inmersión se obtienen ciclos de calentamiento rápidos y puede usarse para soldar muchas uniones en una sola pieza o sobre muchas piezas simultáneamente.

Soldadura dura infrarroja Este método usa el calor de una lámpara infrarroja de alta intensidad. Algunas lámparas para soldadura dura infrarroja son capaces de generar hasta 5 000 W de energía calorífica radiante, la cual puede dirigirse sobre las piezas de trabajo. El proceso es más lento que la mayoría de los otros procesos analizados previamente y por lo general está limitado a secciones delgadas.

Soldadura dura por fusión Este proceso difiere de los otros procesos de soldadura dura en el tipo de unión a la que se aplica. Como se muestra en la figura 32.6, la soldadura dura por fusión se usa para llenar una unión soldada por fusión más convencional, tal como la unión en V que se muestra. Se deposita una mayor cantidad de metal de relleno que en la soldadura dura y no ocurre acción capilar. En la soldadura dura por fusión, la unión consiste por completo de metal de relleno; el metal base no se derrite y por ende no se funde en la unión, como en el proceso de soldadura por fusión convencional. La aplicación principal de la soldadura dura por fusión es el trabajo de reparación.

32.2 SOLDADURA SUAVE

La ***soldadura blanda o suave*** es similar a la soldadura dura y se define como un proceso de unión en el cual se funde un metal de relleno con un punto de fusión (líquidus) que no excede los 450 °C (840 °F) y se distribuye mediante acción capilar entre las superficies de empalme de los metales que se van a unir. Al igual que en la soldadura dura, no ocurre la fusión de los metales base, pero el metal de relleno se humedece y combina con el metal base para formar una unión metalúrgica. Los detalles de la soldadura suave son similares a los de la soldadura dura y muchos de los métodos de calentamiento son iguales. Las superficies que se van a soldar deben limpiarse con anticipación para que estén libres de óxidos, aceites, etcétera. Debe aplicarse un fundente apropiado a las superficies de empalme y éstas tienen que calentarse. Se añade a la unión un metal de relleno, llamado ***soldante***, y se distribuye entre las piezas que se ajustan en forma estrecha.

En algunas aplicaciones, el soldante se recubre de manera previa en una o ambas superficies, un proceso que se denomina ***estañado***, independientemente de si la soldadura contiene o no estaño. Las separaciones típicas en la soldadura varían de 0.075 a 0.125 mm (0.003 a 0.005 in), excepto cuando las superficies están estañadas, en cuyo caso se usa una separación de alrededor de 0.025 mm (0.001 in). Después de la solidificación, debe removerse el residuo de fundente.

Como proceso industrial, la soldadura suave se asocia de manera más cercana con el ensamble de electrónicos (capítulo 36). También se usa para uniones mecánicas, pero no para uniones sujetas a esfuerzos o temperaturas elevados. Las ventajas que se atribuyen a la soldadura suave incluyen 1) una baja entrada de energía en comparación con la soldadura dura y la soldadura por fusión, 2) una variedad de métodos de calentamiento, 3) una buena conductividad eléctrica y térmica en la unión, 4) una capacidad de hacer costuras para envases herméticos al aire y a los líquidos y 5) facilidad de reparar y retrabajar.

Las desventajas más grandes de la soldadura suave son 1) baja resistencia de la unión, a menos que se refuerce mediante medios mecánicos y 2) posible debilitamiento o fusión de la unión en servicios de temperatura elevada.

32.2.1 Diseños de uniones en la soldadura suave

Al igual que en la soldadura dura, las uniones de soldadura suave están limitadas a los tipos empalmados y superpuestos, aunque no deben usarse uniones empalmadas en aplicaciones que soportan carga. También se aplican algunas adaptaciones de la soldadura dura a estas uniones para soldadura suave, y la tecnología de la soldadura suave ha agregado algunas variantes propias para manejar las formas de piezas especiales que ocurren en las conexiones eléctricas. En las uniones mecánicas con soldadura suave de piezas de lámina metálica, los bordes de las láminas frecuentemente se doblan y entrelazan antes de soldar, para aumentar la resistencia de la unión, como se muestra en la figura 32.7.

Para las aplicaciones electrónicas, la función principal de la unión con soldadura suave es proporcionar una trayectoria eléctricamente conductiva entre dos piezas que se unen. Otras consideraciones de diseño en estos tipos de uniones soldadas incluyen la generación de calor (de la resistencia eléctrica de la unión) y la vibración. La resistencia mecánica en una conexión eléctrica con soldadura suave se obtiene frecuentemente mediante la deformación de una o ambas piezas metálicas para conseguir una unión mecánica entre ellas, o haciendo más grande el área de la superficie para proporcionar el máximo soporte mediante la soldadura. En la figura 32.8 se bosquejan varias posibilidades.

32.2.2 Soldantes y fundentes

Los soldantes y los fundentes son los materiales usados en la soldadura suave. Ambos son muy importantes en el proceso de unión.

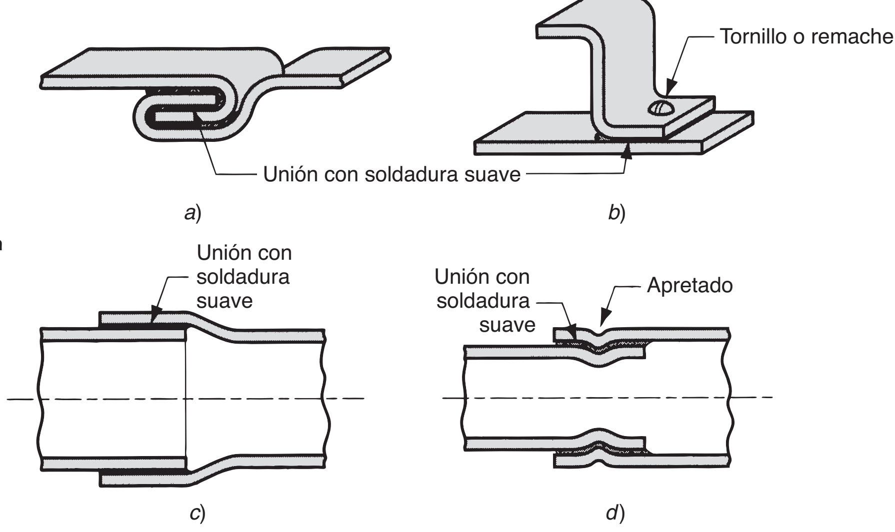


FIGURA 32.7 Entrelazado mecánico en uniones con soldadura suave para aumentar la resistencia: *a*) costura sellada plana; *b*) unión con tornillo o remache; *c*) ajustes en conductos de cobre, unión cilíndrica superpuesta; y *d*) apretado (formado) de unión cilíndrica superpuesta.

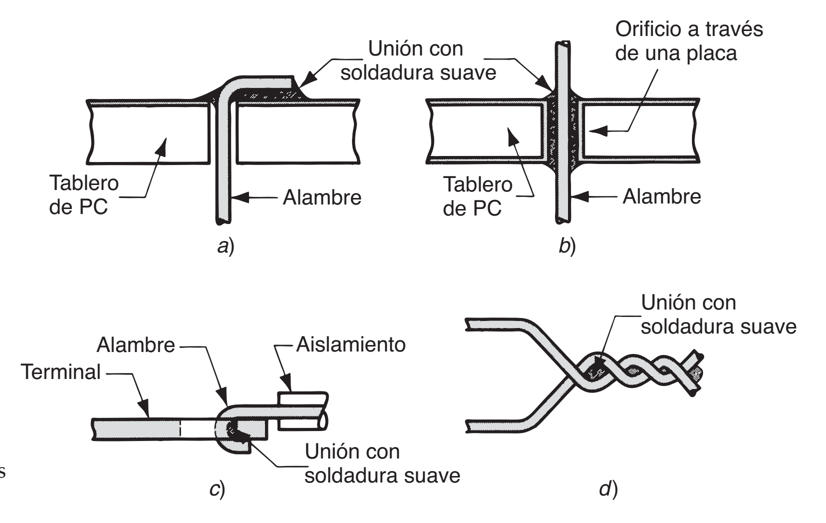


FIGURA 32.8 Técnicas para asegurar la unión con medios mecánicos antes de la soldadura suave en conexiones eléctricas: *a*) alambre de plomo apretado en tablero de PC, *b*) orificio a través de una placa en un tablero de PC, para maximizar la superficie de contacto de la soldadura suave, *c*) alambre enganchado en terminal plana y *d*) alambres trenzados.

Soldantes La mayoría de los soldantes son aleaciones de estaño y plomo, puesto que ambos metales tienen bajos puntos de fusión (véase la figura 6.3). Sus aleaciones poseen un rango de temperaturas de líquidus y de sólidus para obtener un buen control del proceso de soldadura suave para diversas aplicaciones. El plomo es venenoso y su porcentaje se minimiza en la mayoría de los compuestos para soldante. El estaño es químicamente activo a temperaturas para soldadura suave y promueve la acción de humidificación requerida para una unión exitosa. En el cobre para soldadura suave, que es común en las conexiones eléctricas, se forman compuestos intermetálicos de cobre y estaño que fortalecen la unión. En ocasiones también se usan plata y antimonio en las aleaciones para soldadura suave. En la tabla 32.2 se enlistan diversas composiciones de aleaciones para soldadura suave, y también se indican sus temperaturas aproximadas de soldadura y las aplicaciones principales. Los soldantes sin plomo se están volviendo cada vez más importantes conforme se incrementan las leyes que tratan de eliminar el uso del plomo en la soldadura.

Fundentes para soldadura suave Los ***fundentes para soldadura suave*** deben 1) fundirse a temperaturas de soldadura suave, 2) remover películas de óxido y manchas de las superficies de las piezas base, 3) evitar la oxidación durante el calentamiento, 4) promover la humidificación de las superficies de empalme, 5) ser fáciles de desplazar mediante la soldadura fundida durante el proceso y 6) dejar un residuo que no sea corrosivo ni conductivo. Desafortunadamente, no existe un fundente único que cumpla todas estas funciones a la

TABLA 32.2 Algunas composiciones comunes de aleaciones para soldadura suave con sus temperaturas de fusión y aplicaciones.

Metal de relleno	Composición aproximada	Temperatura de fusión aproximada °C	°F	Aplicaciones principales
Plomo-plata	96 Pb, 4 Ag	305	580	Uniones a temperatura elevada
Estaño-antimonio	95 Sn, 5 Sb	238	460	Plomería y calefacción
Estaño-plomo	63 Sn, 37 Pb	183[a]	361[a]	Electricidad/electrónica
	60 Sn, 40 Pb	188	370	Electricidad/electrónica
	50 Sn, 50 Pb	199	390	Propósito general
	40 Sn, 60 Pb	207	405	Radiadores de automóviles
Estaño-plata	96 Sn, 4 Ag	221	430	Envases de alimentos
Estaño-zinc	91 Sn, 9 Zn	199	390	Uniones de aluminio
Estaño-plata-cobre	95.5 Sn, 3.9 Ag, 0.6 Cu	217	423	Electrónica: tecnología del montaje de superficie

Recopilado de [1], [2], [5] y [9].

[a]Composición eutéctica, el punto de fusión más bajo de las composiciones estaño-plomo.

perfección para todas las combinaciones de soldadura y metales base. La formulación del fundente debe seleccionarse para una aplicación dada.

Los fundentes para soldadura suave se clasifican como orgánicos o inorgánicos. Los ***fundentes orgánicos*** están hechos de resina (es decir, resina natural como goma de madera, que no es soluble en agua) o ingredientes solubles en agua (por ejemplo, alcoholes, ácidos orgánicos y sales halogenadas). Los solubles en agua facilitan la limpieza después de la soldadura suave. Los fundentes orgánicos se usan de manera más común para conexiones eléctricas y electrónicas. Tienden a ser químicamente reactivos a temperaturas de soldadura suave elevadas, pero relativamente no corrosivos a temperatura ambiente. Los ***fundentes inorgánicos*** consisten en ácidos inorgánicos (por ejemplo, ácido muriático) y sales (como combinaciones de zinc y cloruros de amonio) y se usan para lograr un fundente rápido y activo donde las películas de óxido son un problema. Las sales se activan cuando se funden, pero son menos corrosivas que los ácidos. Cuando se apoya un alambre de soldadura suave con un ***núcleo de ácido,*** éste pertenece a la categoría de fundentes inorgánicos.

Tanto los fundentes orgánicos como los inorgánicos deben removerse después de la soldadura suave, pero esto es especialmente importante en el caso de los ácidos inorgánicos, para evitar una corrosión continua de las superficies metálicas. Por lo general, la remoción de fundente se logra usando soluciones de agua, excepto en el caso de las resinas, que requieren solventes químicos. Las tendencias recientes en la industria se inclinan más por los fundentes solubles en agua que por las resinas, porque los solventes químicos usados en las resinas son dañinos para el ambiente y los seres humanos.

32.2.3 Métodos para soldadura suave

Muchos de los métodos usados en la soldadura suave son iguales a los que se emplean en la soldadura dura, excepto porque se requieren temperaturas más bajas para la primera. Estos métodos incluyen la soldadura suave con soplete, en horno, por inducción, por resistencia, por inmersión e infrarroja. Existen otros métodos de soldadura suave, que no se emplean en la soldadura dura, que deben describirse aquí. Estos métodos son la soldadura suave manual, la soldadura suave en olas y la soldadura suave por reflujo.

Soldadura suave manual Se realiza en forma manual usando hierro caliente para soldadura suave. Un ***punto***, hecho de cobre, es el extremo de trabajo de hierro para soldadura suave. Sus funciones son 1) proporcionar calor a las piezas que se van a soldar, 2) fundir el soldante, 3) conducir al soldante fundido a la unión y 4) retirar el exceso de soldante. La mayoría de los hierros para soldadura modernos se calientan mediante resistencia eléctrica. Algunos están diseñados como ***pistolas para soldadura*** de calentamiento rápido, los cuales son populares en el ensamble electrónico para operación intermitente (encendido-apagado). Son capaces de realizar una unión de soldadura suave en un segundo.

Soldadura suave en olas La soldadura suave en olas es una técnica mecanizada que permite que se suelden varios alambres de plomo en una tarjeta de circuitos impresos (PCB, por sus siglas en inglés), conforme pasa una ola de soldadura suave fundida. La disposición típica es tal que se carga una PCB, donde los componentes electrónicos se han colocado con sus alambres de plomo que sobresalen por los orificios de la tarjeta, sobre un transportador que lo conduce a través del equipo para soldadura suave en olas. El transportador sujeta la PCB por los lados, de manera que la parte inferior quede expuesta a los siguientes pasos del procesamiento: 1) se aplica fundente usando alguno de los diferentes métodos, incluidos la aplicación de espuma, por aspersión o por cepillado; 2) se usa un precalentamiento (mediante focos, bobinas de calentamiento y dispositivos infrarrojos) con el fin de evaporar solventes, activar el fundente y elevar la temperatura del ensamble; y 3) se usa la soldadura suave en olas para bombear soldante líquido desde un baño fundido, a través de una ranura en la parte inferior del tablero, para hacer las conexiones de soldadura entre los alambres de plomo y el circuito metálico en la tarjeta. Este tercer paso se ilustra en la figura 32.9. Con frecuencia la tarjeta se inclina ligeramente, como se muestra en el esquema, y se mezcla un aceite estañante especial con el soldante fundido para disminuir su tensión superficial. Estas

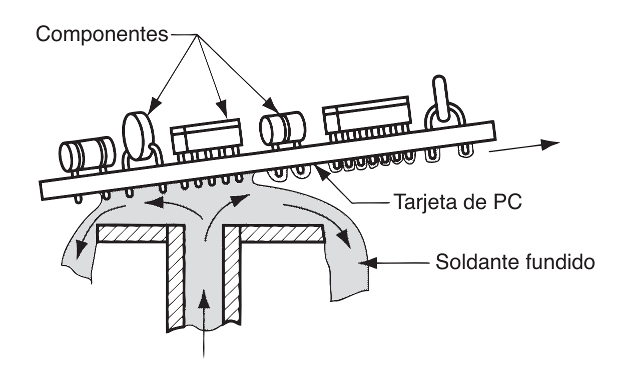


FIGURA 32.9 La soldadura suave en olas, en la cual se distribuye soldante fundido a través de una ranura delgada sobre la parte inferior de una tarjeta de circuitos impresos para conectar los alambres de plomo componentes.

dos medidas ayudan a inhibir la acumulación de soldadura y la formación de "carámbanos" en la parte inferior de la tarjeta. La soldadura suave en olas se usa ampliamente en la electrónica para producir ensambles de tarjetas de circuitos impresos (sección 36.3.2).

Soldadura suave por reflujo Este proceso también se usa ampliamente en electrónica para ensamblar componentes montados en superficies de tarjetas de circuitos impresos (sección 36.4.2). En el proceso, una pasta para soldadura, que consiste en polvos de soldadura en un aglutinante fundente, se aplica a puntos en la tarjeta donde se van a hacer contactos eléctricos entre los componentes montados en la superficie y el circuito de cobre. Después, los componentes se colocan en los puntos de la pasta, y el tablero se calienta para fundir el soldante, formando uniones mecánicas y eléctricas entre las puntas de los componentes y el cobre en la tarjeta de circuitos.

Los métodos de calentamiento para la soldadura suave por reflujo incluyen el reflujo de fase de vapor y el reflujo infrarrojo. En la ***soldadura suave con reflujo de fase de vapor***, un hidrocarburo líquido inerte tratado con flúor se vaporiza en un horno mediante calentamiento y después se condensa en la superficie de la tarjeta, donde transfiere su calor de vaporización para fundir la pasta para soldadura y formar uniones soldadas en las tarjetas de circuitos impresos. En la ***soldadura suave infrarroja por reflujo*** se usa el calor de una lámpara infrarroja para fundir la pasta de soldante y formar uniones entre las puntas de los componentes y las áreas de circuitos en la tarjeta. Algunos métodos de calentamiento adicionales para refundir la pasta de soldante incluyen: el uso de placas calientes, aire caliente y láseres.

32.3 PEGADO ADHESIVO

El uso de los adhesivos data de épocas antiguas (nota histórica 32.1), y el pegado fue probablemente el primero de los métodos de unión permanente. En la actualidad, los adhesivos tienen un amplio rango de aplicaciones de pegado y sellado para unir materiales similares y diferentes, como metales, plásticos, cerámica, madera, papel y cartón. Aunque está bien establecida como una técnica de unión, el pegado se considera un área en crecimiento entre las tecnologías de ensamble, debido a las tremendas oportunidades para aplicaciones cada vez más grandes.

Nota histórica 32.1 *Pegado adhesivo.*

Los adhesivos datan de tiempos antiguos. Grabados con 3 300 años de antigüedad muestran una vasija de pegamento y brocha para pegar chapas a planchas de madera. Los antiguos egipcios usaban goma del árbol de acacia para diversos propósitos de ensamble y sellado. El betún natural, un asfalto adhesivo, fue usado en épocas antiguas como cemento y mortero para la construcción en Asia Menor. Los romanos usaban alquitrán de madera de pino y cera de abejas para calafatear sus embarcaciones. En los primeros siglos después de Cristo se usaron pegamentos derivados de los peces, de los cuernos de ciervo y del queso para ensamblar componentes de madera.

En tiempos más recientes, los adhesivos se han convertido en un importante proceso de unión. La madera contrachapada (el triplay) fue creada alrededor de 1900, y utiliza adhesivos para unir varias capas de madera. El fenol formaldehído fue el primer adhesivo sintético, inventado alrededor de 1910, que se usó principalmente para unir productos tales como la madera contrachapada. Durante la Segunda Guerra Mundial se crearon resinas fenólicas para el pegado de ciertos componentes de aeronaves. En la década de 1950 se comenzaron a formular epóxicos. Y a partir de esa misma década, se ha desarrollado una variedad de adhesivos adicionales que incluyen los anaeróbicos, diversos polímeros nuevos y los acrílicos de segunda generación.

El ***pegado adhesivo*** es un proceso de unión en el cual se usa un material de relleno para mantener juntas dos (o más) piezas con espacio muy pequeño mediante la anexión superficial. El material de relleno que une las piezas es el ***adhesivo***. Es una sustancia no metálica, por lo general un polímero. Las piezas que se unen se llaman ***adherentes***. Los adhesivos de mayor interés en la ingeniería son los ***adhesivos estructurales***, que son capaces de formar uniones fuertes y permanentes entre piezas adheridas fuertes y rígidas. Existe una gran cantidad de adhesivos disponibles comercialmente, que se curan mediante diversos mecanismos y son convenientes para la unión de diferentes materiales. El ***curado*** se refiere al proceso mediante el cual se modifican las propiedades físicas del adhesivo de líquido a sólido, por lo general mediante una reacción química para obtener la sujeción de las superficies de las piezas. La reacción química puede implicar una polimerización, condensación o vulcanización. A menudo, el curado se ocasiona mediante calor o por medio de un catalizador, y en ocasiones se aplica presión entre las dos piezas para activar el proceso de unión. Si se requiere calor, las temperaturas de curado son relativamente bajas, por lo que generalmente no se afectan los materiales que se unen, lo cual es una ventaja del pegado adhesivo. El curado o endurecimiento de los adhesivos requiere un tiempo determinado, que se denomina ***tiempo de curado*** o ***tiempo de estabilizado***. En algunos casos este tiempo es significativo; por lo general, ésta es una desventaja en la manufactura.

La resistencia de la unión en el pegado adhesivo está determinada por la resistencia del adhesivo mismo y la resistencia de la sujeción entre el adhesivo y cada uno de los adherentes. Uno de los criterios que se usa con frecuencia para definir un pegado satisfactorio es que si ocurre una falla debido a los esfuerzos excesivos, debe producirse en una de las piezas que se vayan a adherir y no en una interfaz o dentro del adhesivo mismo. La resistencia de la adhesión resulta de varios mecanismos y todos ellos dependen del adhesivo y los adherentes particulares: 1) unión química, en la cual el adhesivo se une a las piezas y forma una unión química primaria después del endurecimiento; 2) interacciones físicas, en las cuales se producen fuerzas de unión secundarias entre los átomos de las superficies opuestas y 3) entrelazado mecánico, en el cual la tenacidad de superficie de las piezas adheridas provoca que el adhesivo endurecido se enrede o atrape en sus asperezas superficiales microscópicas.

Para que estos mecanismos de adhesión operen con mejores resultados, deben prevalecer las siguientes condiciones: 1) las superficies de los adherentes deben estar limpias, libres de películas de suciedad, aceite y óxido que podrían interferir en la obtención del contacto íntimo entre el adhesivo y los adherentes, por lo que frecuentemente se requiere una preparación especial de las superficies; 2) el adhesivo en su forma líquida inicial debe conseguir una humidificación completa de la superficie del adherente; y 3) por lo general resulta útil que las superficies no estén perfectamente lisas, una superficie ligeramente áspera aumenta el área de contacto real y promueve el entrelazado mecánico. Además, la unión debe diseñarse para explotar las resistencias particulares del pegado y evitar sus limitaciones.

32.3.1 Diseño de uniones

Por lo general, las uniones con adhesivos no son tan fuertes como las de soldadura por fusión, soldadura suave o soldadura dura. En consecuencia, debe tenerse en consideración el diseño de las uniones adhesivas. Los siguientes principios se aplican en el diseño de uniones: 1) Debe maximizarse el área de contacto de la unión. 2) Los pegados adhesivos son más fuertes ante el corte y la tensión, como en la figura 32.10 *a*) y *b*), y las uniones deben

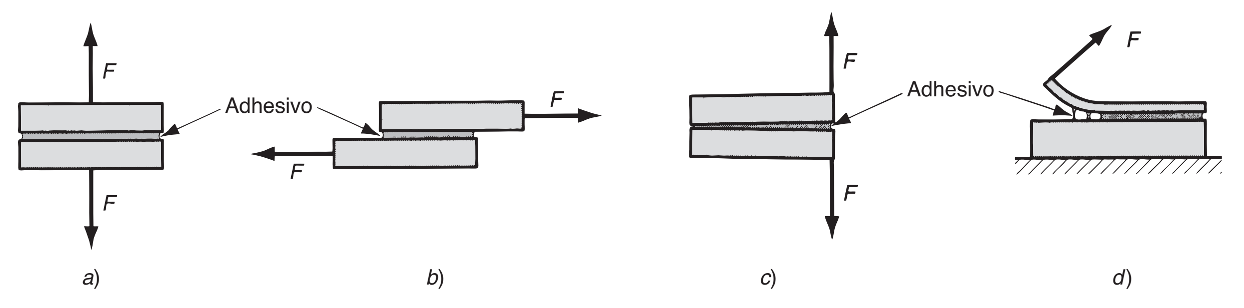


FIGURA 32.10 Tipos de esfuerzos que deben considerarse en la unión adhesiva: *a*) de tensión, *b*) de corte, *c*) de hendidura y *d*) de desprendimiento.

diseñarse para que se apliquen esfuerzos de estos tipos. 3) Los pegados son más débiles en hendiduras o desprendimientos, como en la figura 32.10 *c*) y *d*), y las uniones adhesivas deben diseñarse para evitar estos tipos de esfuerzos.

Los diseños de unión típicos para el pegado adhesivo que ilustran estos principios se presentan en la figura 32.11. Algunos diseños de unión combinan el pegado con otros métodos para incrementar la resistencia y proporcionar un sellado entre los dos componentes. Algunas de las posibilidades se muestran en la figura 32.12. Por ejemplo, la combinación del pegado adhesivo y la soldadura de puntos se denomina ***adhesivo soldado***.

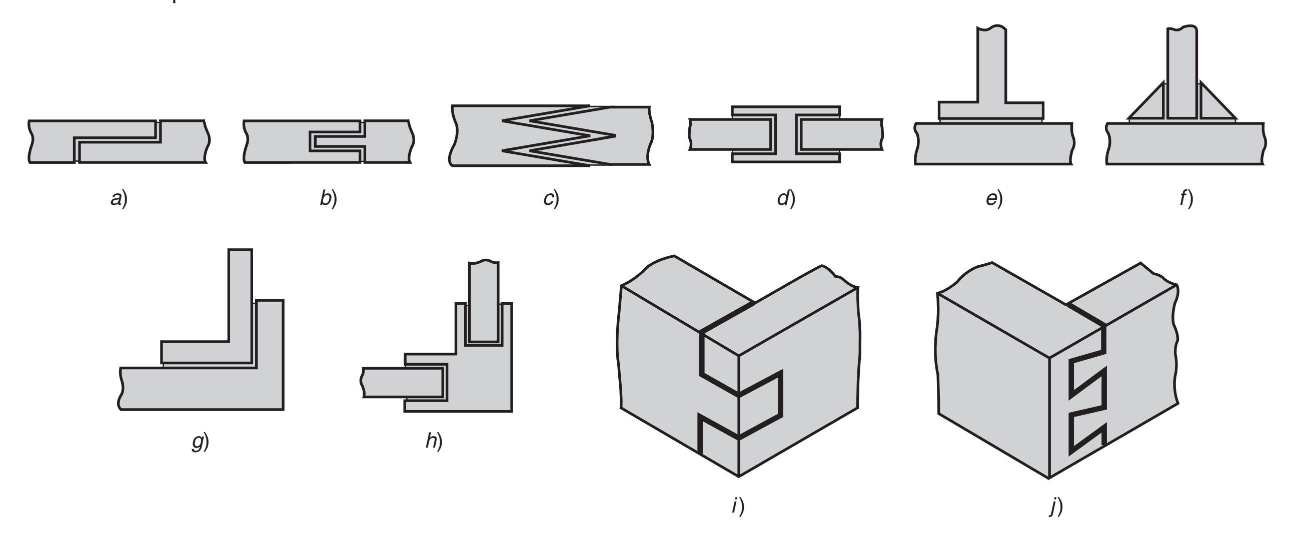
Además de la configuración mecánica de la unión, la aplicación debe seleccionarse para que las propiedades físicas y químicas del adhesivo y los adherentes sean compatibles bajo las condiciones de uso a las que está sujeto el ensamble. Los materiales de los adherentes incluyen metales, cerámica, vidrio, plástico, madera, hule, cuero, tela, papel y cartón. Observe que la lista incluye materiales rígidos y flexibles, porosos y no porosos, metálicos y no metálicos, y que es posible unir sustancias semejantes o diferentes.

32.3.2 Tipos de adhesivos

Existe una gran cantidad de adhesivos comerciales disponibles. Se clasifican en tres categorías: 1) naturales, 2) inorgánicos y 3) sintéticos.

Los ***adhesivos naturales*** se derivan de fuentes naturales (plantas y animales) e incluyen las gomas, el almidón, la dextrina, el flúor de soya y el colágeno. Esta categoría de adhesivos por lo general está limitada a aplicaciones de bajo esfuerzo, como cartulinas,

FIGURA 32.11 Algunos diseños de uniones adhesivas: de la *a*) a la *d*), uniones empalmadas; *e*) y *f*), uniones en T; de la *g*) a la *j*), uniones en esquina.



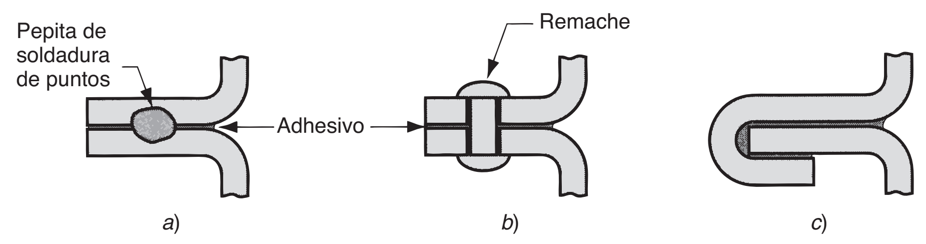


FIGURA 32.12 Pegado adhesivo combinado con otros métodos: *a*) adhesivo soldado, con soldadura de puntos y pegado adhesivo; *b*) remachado (o atornillado) y pegado adhesivo y *c*) formado más pegado adhesivo.

muebles y encuadernación de libros, o donde están involucradas áreas de superficies grandes (por ejemplo, madera contrachapada). Los ***adhesivos inorgánicos*** se basan de manera principal en el silicato de sodio y el oxicloruro de magnesio. Aunque su costo es relativamente bajo, también lo es su resistencia, lo que representa una seria limitación en un adhesivo estructural.

Los ***adhesivos sintéticos*** son la categoría más importante en la manufactura. Incluyen diversos polímeros termoplásticos y termofijos, muchos de los cuales se enlistan y describen brevemente en la tabla 32.3. Se curan mediante diversos mecanismos, entre los que se encuentran: 1) la mezcla de un catalizador o ingrediente reactivo con el polímero justo antes de aplicarlo; 2) el calentamiento para iniciar una reacción química; 3) el curado con radiación, tal como la luz ultravioleta y 4) el curado mediante la evaporación del agua del adhesivo líquido o en pasta. Además, algunos adhesivos sintéticos se aplican como películas o como recubrimientos sensibles a la presión en la superficie de uno de los adherentes.

32.3.3 Tecnología de aplicación de los adhesivos

Las aplicaciones industriales del pegado adhesivo son extensas y están en crecimiento. Los usuarios principales son las industrias automotriz, aeronáutica, de productos de la construcción y de embalaje; otras industrias que las incluyen son del calzado, los muebles, la encuadernación de libros, la eléctrica y la construcción de embarcaciones. La tabla 32.3 indica algunas de las aplicaciones específicas para las que se usan adhesivos sintéticos. En

TABLA 32.3 Adhesivos sintéticos importantes.

Adhesivo	Descripción y aplicaciones
Anaeróbico	Basado en acrílico, termofijo, de componente único. Se cura mediante un mecanismo de radicales libres a temperatura ambiente. Aplicaciones: sellador, ensamble estructural.
Acrílicos modificados	Termofijo, de dos componentes, que consiste en una resina basada en acrílico y un iniciador/endurecedor. Se cura a temperatura ambiente después de la mezcla. Aplicaciones: fibra de vidrio en embarcaciones, láminas de metal en autos y aeronaves.
Cianoacrilato	Basado en acrílico, termofijo, de componente único que se cura a temperatura ambiente en superficies alcalinas. Aplicaciones: caucho para plástico, componentes electrónicos en tarjetas de circuitos, empaques de plástico y metálicos para cosméticos.
Epóxico	Incluye una variedad de adhesivos de uso extenso formulados a partir de resinas epóxicas, agentes de curado, y rellenos/modificadores que se endurecen después de la mezcla. Algunos se curan cuando se calientan. Aplicaciones: unión de aluminio y paneles alveolados para aeronaves, refuerzos de láminas metálicas para automóviles, laminado de vigas de madera, sellos en electrónica.
Fundido al calor	Termoplástico de componente único que endurece a partir de un estado de fusión cuando se enfría a partir de temperaturas elevadas. Se formula a partir de polímeros termoplásticos que incluyen: el acetato de viniletileno, el polietileno, el copolímero de bloque de estireno, el caucho butílico, la poliamida, el poliuretano y el poliéster. Aplicaciones: empaques (por ejemplo, envases, rótulos), muebles, calzado, encuadernación de libros, instalación de alfombras y ensambles en artículos eléctricos y automóviles.
Cintas y películas sensibles a la presión	Por lo general son sensibles a la presión de un componente en forma sólida que posee alta viscosidad, lo cual produce una unión cuando se aplica presión. Se forman a partir de diversos polímeros de alto peso molecular. Pueden tener el adhesivo en uno o ambos lados. Aplicaciones: paneles solares, ensambles electrónicos, plásticos para madera y metales.
Silicón	Líquido termofijo, de uno o dos componentes, basado en polímeros de silicio. Se cura a temperatura ambiente para caucho sólido. Aplicaciones: sellos en autos (por ejemplo, en parabrisas), sellos y aislamiento en electrónica, empaques, unión de plásticos.
Uretano	Termofijo, de uno o dos componentes, basado en polímeros de uretano. Aplicaciones: unión de fibra de vidrio y plásticos.

Recopilado de [6], [8] y [10].

esta sección se consideran varios aspectos relacionados con la tecnología de aplicación de los adhesivos.

Preparación de la superficie Para que una unión adhesiva tenga éxito, las superficies de las piezas deben estar extremadamente limpias. La resistencia de la unión depende del grado de adhesión entre el adhesivo y los adherentes, y esto depende de la limpieza de la superficie. En la mayoría de los casos, se requieren pasos de procesamiento adicionales para la limpieza y preparación de las superficies, los métodos varían de acuerdo con los distintos materiales de los adherentes. Para los metales se usa con frecuencia el frotado con solventes y el desgaste de la superficie mediante chorro de arena u otros procesos por lo general esto mejora la adherencia. Para piezas no metálicas, generalmente se usa algún tipo de limpiador solvente, y en ocasiones las superficies se desgastan en forma mecánica o se atacan químicamente para aumentar la aspereza. Es deseable realizar el proceso de pegado lo más pronto posible después de estos tratamientos, puesto que mientras transcurre el tiempo aumentan la oxidación de las superficies y la acumulación de impurezas.

Métodos de aplicación La aplicación real del adhesivo en una o ambas superficies de las piezas se realiza en diversas formas. La lista siguiente, aunque incompleta, proporciona una muestra de las técnicas usadas en la industria:

- ***Aplicación con brocha.*** Se realiza en forma manual usando una brocha de cerdas duras. Los recubrimientos resultantes con frecuencia no son uniformes.
- ***Por flujo.*** Se utilizan pistolas de flujo alimentadas a presión de operación manual para un control más consistente que con brocha.
- ***Rodillos manuales.*** Son similares a los rodillos de pintura para aplicar adhesivo de un contenedor plano.
- ***Serigrafía.*** Consiste en aplicar el adhesivo para sólo cubrir las áreas seleccionadas de la superficie de las piezas a través de áreas abiertas en la pantalla.
- ***Por aspersión.*** Se usa una pistola de aspersión impulsada por aire (o sin aire) para una aplicación rápida sobre áreas grandes o difíciles de alcanzar.
- ***Con aplicadores automáticos.*** Éstos incluyen diversos dispensadores y boquillas automáticas para usarse en aplicaciones de producción a velocidades medias y altas. La figura 32.13 ilustra el uso de un surtidor para ensamble.



FIGURA 32.13 El adhesivo se aplica mediante un dispensador controlado en forma manual a las piezas de la unión durante el ensamble. (Foto cortesía de EFD, Inc.).

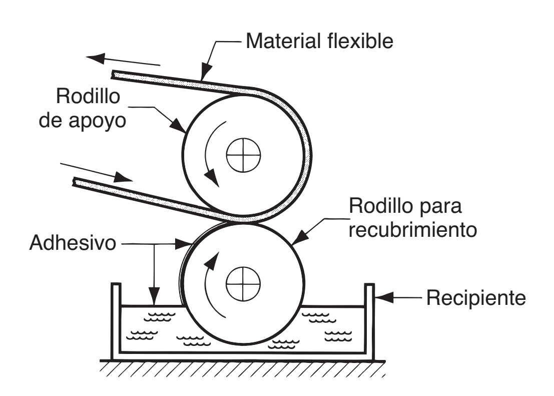


FIGURA 32.14 Recubrimiento mediante rodillo con adhesivo sobre materiales flexibles y delgados, como papel, tela o polímeros flexibles.

➢ ***Recubrimiento mediante rodillo.*** Es una técnica mecanizada en la cual se sumerge parcialmente un rodillo en un recipiente con adhesivo líquido y recoge un recubrimiento de adhesivo, el cual se transfiere después a la superficie de trabajo. La figura 32.14 muestra una aplicación posible, en la cual la pieza de trabajo es un material flexible delgado (por ejemplo, papel, tela, cuero o plástico). Se usan variaciones de este método para recubrir con adhesivo madera, compuestos de madera, cartones y materiales semejantes en áreas con superficies grandes.

Ventajas y limitaciones Las ventajas de las uniones adhesivas son: 1) el proceso es aplicable a una amplia variedad de materiales; 2) es posible unir piezas con diferentes tamaños y secciones transversales, las piezas frágiles se pegan mediante uniones adhesivas; 3) la unión ocurre sobre el área completa de la unión, y no sólo en puntos separados o a lo largo de costuras, como en la soldadura por fusión; por lo tanto, las tensiones se distribuyen por completo en el área; 4) algunos adhesivos son flexibles después de la unión y por lo tanto toleran una carga cíclica y diferencias en la expansión térmica de los adherentes; 5) el curado a baja temperatura evita daños a las piezas que se unen; 6) es posible obtener un sellado al mismo tiempo que la adhesión; y 7) con frecuencia se simplifica el diseño de uniones (por ejemplo, se unen dos superficies planas sin incorporar características de piezas especiales tales como orificios para tornillos).

Las principales limitaciones de esta tecnología son: 1) las uniones generalmente no son tan fuertes como con otros métodos, 2) el adhesivo debe ser compatible con los materiales que se van a unir, 3) las temperaturas de uso son limitadas, 4) son importantes la limpieza y la preparación de las superficies antes de la aplicación del adhesivo, 5) los tiempos de curado pueden imponer un límite sobre las velocidades de producción y 6) la inspección de la unión adherida es difícil de realizar.

REFERENCIAS

[1] Bastow, E., "Five Solder Families and How They Work", ***Advanced Materials & Processes***, diciembre de 2003, pp. 26-29.

[2] Bilotta, A. J., ***Connections in Electronic Assemblies,*** Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1985.

[3] Bralla, J. G. (editor en jefe), ***Design for Manufacturability Handbook***, 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[4] ***Brazing Manual,*** American Welding Society, Nueva York, 1963.

[5] Cary, H. B. y Helzer, S. C., ***Modern Welding Technology,*** 6a. ed., Pearson/Prentice-Hall. Upper Saddle River, N. J., 2005.

[6] Doyle, D. J., "The Sticky Six—Steps for Selecting Adhesives", ***Manufacturing Engineering***, junio de 1991, pp. 39-43.

[7] Driscoll, B. y Campagna. J., "Epoxy, Acrylic, and Urethane Adhesives", ***Advanced Materials & Processes***, agosto de 2003, pp. 73-75.

[8] Hartshorn, S. R. (ed.), ***Structural Adhesives, Chemistry and Technology***, Plenum Press, Nueva York. 1986.

[9] Lambert, L. P., ***Soldering for Electronic Assemblies***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1988.

[10] Lincoln, B., Gomes, K. J. y Braden, J. F., ***Mechanical Fastening of Plastics,*** Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1984.

[11] O'Brien. R. L., ***Welding Handbook***, 8a ed., vol. 2, ***Welding Processes.*** American Welding Society, Miami, Fl., 1991.
[12] Petrie, E. M., ***Handbook of Adhesives and Sealants,*** McGraw-Hill, Monterey, Calif., 1999.
[13] Schneberger, G. L. (ed.), ***Adhesives in Manufacturing***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1983.
[14] Shields. J., ***Adhesives Handbook***, 3a. ed., Butterworths Heinemann, Woburn, Inglaterra, 1984.
[15] Skeist, I. (ed.), ***Handbook of Adhesives***, 3a. ed., Chapman & Hall, Nueva York, 1990.
[16] ***Soldering Manual***, 2a. ed., American Welding Society, Miami, Fl., 1978.
[17] Wick, C. y Veilleux. R. F. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. 4, ***Quality Control and Assembly***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1987.

PREGUNTAS DE REPASO

32.1. ¿En qué son diferentes la soldadura dura y la soldadura suave de los procesos de soldadura por fusión?
32.2. ¿En qué son diferentes la soldadura dura y la soldadura suave de los procesos de soldadura de estado sólido?
32.3. ¿Cuál es la diferencia técnica entre la soldadura dura y la soldadura suave?
32.4. ¿Bajo qué circunstancias se prefiere la soldadura dura o la soldadura suave sobre la soldadura por fusión?
32.5. ¿Cuáles son los dos tipos de uniones que se usan más comúnmente en la soldadura dura?
32.6. Por lo general, se hacen ciertos cambios en la configuración de uniones para mejorar la resistencia de uniones hechas con soldadura dura. ¿Cuáles son algunos de estos cambios?
32.7. El metal de relleno fundido en la soldadura dura se distribuye por toda la unión mediante acción capilar. ¿Qué es la acción capilar?
32.8. ¿Cuáles son las características deseables de un fundente para soldadura dura?
32.9. ¿Qué es soldadura dura por inmersión?
32.10. Defina soldadura dura por fusión.
32.11. ¿Cuáles son algunas de las desventajas y limitaciones de la soldadura dura?
32.12. ¿Cuáles son los dos metales para aleación más comunes usados en la soldadura suave?
32.13. ¿Para qué sirve la punta de una soldadura de hierro en la soldadura suave manual?
32.14. ¿Qué es la soldadura suave en olas?
32.15. Enliste las ventajas que se atribuyen con frecuencia a la soldadura suave como un proceso de unión industrial.
32.16. ¿Cuáles son las desventajas de la soldadura suave?
32.17. ¿Qué significa el término adhesivo estructural?
32.18. Un adhesivo debe curarse para poder unir. ¿Qué significa el término curado?
32.19. ¿Cuáles son algunos de los métodos usados para curar un adhesivo?
32.20. Mencione las tres categorías básicas de los adhesivos comerciales.
32.21. ¿Cuál es una precondición importante para que una operación de unión adhesiva tenga éxito?
32.22. ¿Cuáles son algunos de los métodos usados para aplicar adhesivos en las operaciones de producción industrial?
32.23. Identifique algunas de las ventajas del pegado en comparación con los métodos de unión alternativos.
32.24. ¿Cuáles son algunas de las limitaciones del pegado adhesivo?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 20 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

32.1. En la soldadura dura, los metales base se funden a temperaturas superiores a 840 °F (450 °C), mientras que en la soldadura suave se funden a 840 °F (450 °C) o menos: ¿*a*) cierto o *b*) falso?
32.2. ¿Cómo es normalmente la resistencia de una unión hecha con soldadura dura: *a*) igual a, *b*) mayor que o *c*) menor que la resistencia del metal de relleno utilizado?
32.3. El biselado en la soldadura dura de una unión empalmada implica envolver con una chapa las dos piezas que se van a unir, para que contenga el metal de relleno fundido durante el proceso de calentamiento: ¿*a*) cierto o *b*) falso?
32.4. ¿Las mejores separaciones entre las superficies en la soldadura dura, se encuentran en cuál de los siguientes rangos?: *a*) 0.0025 a 0.025 mm (0.0001 a 0.001 in), *b*) 0.025 a 0.250 mm (0.001 a 0.010 in), *c*) 0.250 a 2.50 mm (0.010 a 0.100 in) o *d*) 2.5 a 5.0 mm (0.10 a.0.20 in).
32.5. ¿Cuál de las siguientes opciones es una ventaja en la soldadura dura? (tres mejores respuestas): *a*) El recocido de las piezas base es un subproducto del proceso, *b*) pueden unirse metales distintos, *c*) se requiere menos calor y energía que en la soldadura por fusión, *d*) se logran mejoras metalúrgicas en los metales base, *e*) puede hacerse varias uniones en

forma simultánea, *f*) las piezas pueden desensamblarse con facilidad y *g*) la unión es más fuerte que en la soldadura por fusión.

32.6. ¿Cuál de los siguientes métodos de soldadura suave no se usa para soldadura dura? (dos respuestas correctas): *a*) soldadura suave por inmersión, *b*) soldadura suave infrarroja, *c*) hierro para soldadura suave, *d*) soldadura suave con soplete y *e*) soldadura suave en olas.

32.7. ¿Cuál de las siguientes opciones no es una función de un fundente en la soldadura dura o en la soldadura suave? *a*) atacar químicamente las superficies para aumentar la aspereza y lograr una mejor adhesión del metal de relleno, *b*) promover la humidificación de las superficies, *c*) proteger las superficies de empalme durante el proceso, *d*) remover o inhibir la formación de películas de óxido.

32.8. ¿Cuál de los siguientes metales se usa en las aleaciones para soldadura suave? (cuatro respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) antimonio, *c*) oro, *d*) hierro, *e*) plomo, *f*) níquel, *g*) plata, *h*) estaño, *i*) titanio.

32.9. Una pistola para soldadura suave es capaz de inyectar metal soldante fundido en el área de unión: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

32.10. En el pegado adhesivo, ¿cuál de los siguientes es el término que se usa para las piezas que se van a unir?: *a*) adherentes, *b*) adherendos, *c*) adhesivos, *d*) adhibidos o *e*) ad infinitum.

32.11. El adhesivo soldado es un método de pegado en el cual se usa calor para fundir el adhesivo: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

32.12. ¿Bajo cuál tipo de esfuerzos son más fuertes las uniones hechas con adhesivos? (dos mejores respuestas): *a*) de hendidura, *b*) de desprendimiento, *c*) de corte, *d*) de tensión.

32.13. La rugosidad de las superficies de empalme *a*) no produce ningún efecto, *b*) tiende a aumentar o *c*) tiende a reducir la resistencia de una unión hecha con adhesivos, debido a que incrementa el área efectiva de la unión y promueve el entrelazado mecánico.

33

ENSAMBLE MECÁNICO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En el ensamble mecánico se usan diferentes métodos de sujeción para sostener juntas en forma mecánica dos (o más) piezas. En la mayoría de los casos, los métodos de sujeción implican el uso de componentes de hardware separados, llamados **sujetadores**, que se agregan a las piezas durante la operación de ensamblado. En otros casos, el mecanismo de sujeción implica el formado o reformado de uno de los componentes que se van a ensamblar y no se requieren sujetadores separados. Muchos productos para el consumidor se ensamblan principalmente mediante métodos de sujeción mecánica: automóviles, aparatos eléctricos grandes y pequeños, teléfonos, muebles, utensilios, incluso vestidos se "ensamblan" por medios mecánicos. Además, productos industriales como aviones, herramientas de máquina y equipo de construcción casi siempre implican ensamble mecánico.

Los métodos de sujeción mecánica pueden dividirse en dos clases principales: 1) los que permiten el desensamble y 2) los que crean una unión permanente. Los sujetadores roscados (por ejemplo, tornillos, pernos y tuercas) son ejemplos de la primera clase y los remaches ilustran la segunda. Existen buenas razones por las que con frecuencia se prefiere el ensamble mecánico sobre otros procesos de unión analizados en capítulos anteriores. Las razones principales son 1) la facilidad de ensamble y 2) la facilidad de desensamble (para los métodos de sujeción que lo permiten).

Por lo general, el ensamble mecánico lo realizan con relativa facilidad trabajadores no calificados, con un mínimo de herramientas especiales y en un tiempo relativamente corto. La tecnología es simple y los resultados se inspeccionan con facilidad. Estos factores representan ventajas no sólo en la fábrica, sino también durante la instalación en campo. Los productos que son demasiado grandes y pesados para transportarse ensamblados por

completo pueden enviarse en subensambles más pequeños y después armarse en las instalaciones de los clientes.

Por supuesto, la facilidad de desensamble sólo se aplica a los métodos de sujeción mecánica que lo permiten. Se requiere un desensamble periódico para la mayoría de los productos en los que debe realizarse mantenimiento y reparaciones; por ejemplo, para sustituir componentes gastados, para hacer ajustes, etcétera. Las técnicas de unión permanente, como la soldadura, no permiten el desensamble.

Con propósitos de organización, los métodos de ensamble mecánico se han clasificado en las siguientes categorías: 1) sujetadores roscados, 2) remaches, 3) ajustes de interferencia, 4) otros métodos de sujeción mecánica y 5) insertos en moldeado y sujetadores integrales. Estas categorías se describirán en las secciones de la 33.1 a la 33.5. En la sección 33.6, se analizará un tema importante: el diseño para ensamble. El ensamble de productos electrónicos incluye técnicas mecánicas. Sin embargo, el ensamble de productos electrónicos representa un campo único y especializado, que se cubre en el capítulo 36.

33.1 SUJETADORES ROSCADOS

Los sujetadores roscados son componentes separados de hardware que tienen roscas externas o internas para el ensamble de piezas. En casi todos los casos permiten el desensamble. Los sujetadores roscados son la categoría más importante del ensamble mecánico; los tipos más comunes de sujetadores roscados son los tornillos, los pernos y las tuercas.

33.1.1 Tornillos, pernos y tuercas

Los tornillos y los pernos son sujetadores con roscas externas. Existe una diferencia técnica entre un tornillo y un perno, que con frecuencia se confunde en el uso popular. Un ***tornillo*** es un sujetador con rosca externa que, por lo general, se ensambla en un orificio roscado ciego. Algunos tipos llamados *tornillos autorroscantes* poseen formas que les permiten formar o cortar las roscas correspondientes en el orificio. Un ***perno*** es un sujetador con rosca externa que se inserta a través de orificios en las piezas y se "atornilla" con una tuerca en el lado opuesto. Una ***tuerca*** es un sujetador de rosca interna que coincide con la del perno del mismo diámetro, paso y forma de rosca. Los ensambles típicos que se producen con el uso de tornillos y pernos se ilustran en la figura 33.1.

Los tornillos y los pernos vienen en diversos tamaños, roscas y formas, todas ellas estandarizadas. En la tabla 33.1 se proporciona una selección de los tamaños de sujetadores roscados comunes en unidades métricas (norma ISO) y unidades de uso común en Estados Unidos (norma ANSI).[1] La especificación métrica consta del diámetro mayor nominal, mm, seguido del paso, mm. Por ejemplo, una especificación 4-0.7 implica un diámetro principal de 4.0 mm y un paso de 0.7 mm. La norma de Estados Unidos especifica ya sea un número que designa el diámetro principal (hasta 0.2160 in) o el diámetro mayor nominal, in, seguido por el número de roscas por pulgada. Por ejemplo, la especificación 1/4-20 indica un diámetro principal de 0.25 in y 20 roscas por pulgada. En la tabla se proporcionan tanto pasos gruesos como finos.

En textos de diseño y manuales comunes, puede encontrarse datos técnicos adicionales y otros tamaños de sujetadores roscados estándares. Estados Unidos ha estado convirtiendo gradualmente sus tamaños de sujetadores a unidades métricas, lo cual reducirá la proliferación de especificaciones. Debe observarse que las diferencias entre los sujetadores roscados tienen implicaciones en la manufactura de herramientas. Para usar un tipo parti-

[1] ISO es la abreviatura de International Standard Organization. ANSI es la abreviatura de American National Standards Institute.

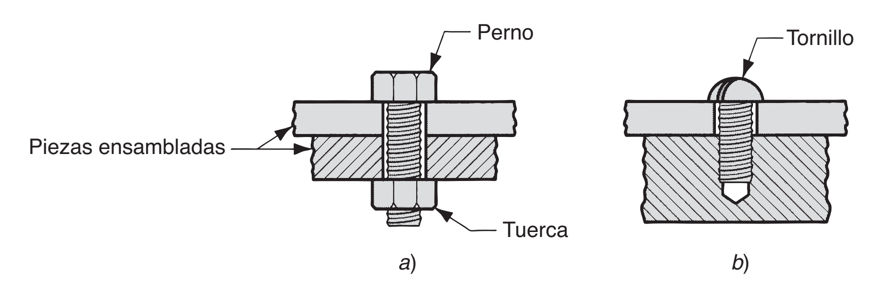


FIGURA 33.1 Ensambles típicos usando: *a*) perno y tuerca y *b*) tornillo.

cular de tornillo o perno, el trabajador que realiza el ensamble debe tener las herramientas diseñadas para tal tipo de sujetador. Por ejemplo, hay disponibles numerosos estilos de cabezas en pernos y tornillos; los más comunes se muestran en la figura 33.2. Las formas de estas cabezas, al igual que los diversos tamaños disponibles, requieren herramientas manuales distintas (por ejemplo, desarmadores) para el operador. No es posible hacer girar un perno con cabeza hexagonal mediante un desarmador (destornillador) convencional de punta plana.

Los tornillos se fabrican en una mayor variedad y configuraciones que los pernos, puesto que sus funciones son más variadas. Los tipos incluyen tornillos para máquina, tornillos de cabeza cuadrada, tornillos prisioneros y tornillos autorroscantes. Los ***tornillos para máquina*** son del tipo general, diseñados para ensamble en huecos roscados. En ocasiones se ensamblan a tuercas, y en este uso coinciden con los pernos. Los ***tornillos de cabeza cuadrada*** tienen la misma forma que los tornillos para máquina, pero están hechos de metales con mayor resistencia y tolerancias más estrechas. Los ***tornillos prisioneros*** se endurecen y diseñan para funciones de ensamble como collarines de sujeción, engranes y poleas para flechas, como se muestra en la figura 33.3 *a*). Se fabrican en diversas formas, algunas de las cuales se ilustran en la figura 33.3 *b*). Un ***tornillo autorroscante*** (también llamado ***tornillo roscante)*** está diseñado para formar o cortar las roscas en un orificio que ya existe, dentro del cual se hace girar. En la figura 33.4 se muestran dos de las formas de rosca comunes para los tornillos autorroscantes.

La mayoría de los sujetadores roscados se produce mediante formado en frío (sección 19.2). Algunos son maquinados (sección 22.1.1), pero generalmente es un proceso más costoso por la elaboración de roscas. Se usa una variedad de materiales para hacer sujetadores roscados, y los aceros están entre los más comunes debido a su buena resistencia y bajo costo. Éstos incluyen acero al bajo y medio carbono, así como aleaciones de acero. Por lo general los sujetadores hechos de acero se chapean o recubren para que su superficie resista la corrosión. Con este propósito se usan recubrimientos de níquel, cromo, zinc, óxido negro y similares. Cuando la corrosión u otros factores impiden el uso de sujetadores de

TABLA 33.1 Normas de tamaño de sujetadores roscados seleccionados, en unidades métricas y de uso común en Estados Unidos.

Norma ISO (métrica)			Norma ANSI (EU)			
Diámetro nominal, mm	Rosca gruesa, mm	Rosca fina, mm	Tamaño nominal	Diámetro principal, in	Roscas/in, gruesa (UNC)[a]	Roscas/in, fina (UNF)[a]
2	0.4		2	0.086	56	64
3	0.5		4	0.112	40	48
4	0.7		6	0.138	32	40
5	0.8		8	0.164	32	36
6	1.0		10	0.190	24	32
8	1.25		12	0.216	24	28
10	1.5	1.25	1/4	0.250	20	28
12	1.75	1.25	3/8	0.375	16	24
16	2.0	1.5	1/2	0.500	13	20
20	2.5	1.5	5/8	0.625	11	18
24	3.0	2.0	3/4	0.750	10	16
30	3.5	2.0	1	1.000	8	12

[a]Por sus siglas en inglés, UNC significa gruesa unificada y UNF quiere decir fina unificada, en la norma ANSI.

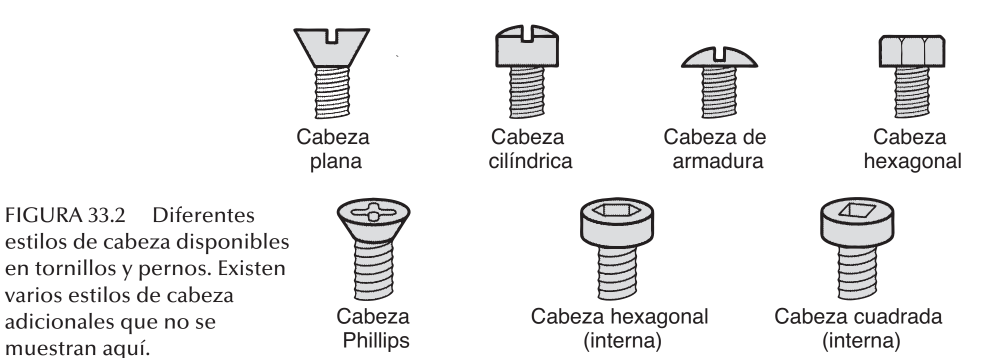


FIGURA 33.2 Diferentes estilos de cabeza disponibles en tornillos y pernos. Existen varios estilos de cabeza adicionales que no se muestran aquí.

acero, se deben usar otros materiales que incluyen aceros inoxidables, aleaciones de aluminio, aleaciones de níquel y plásticos (sin embargo, los plásticos sólo son convenientes para aplicaciones de bajo esfuerzo).

33.1.2 Otros sujetadores roscados y equipo relacionado

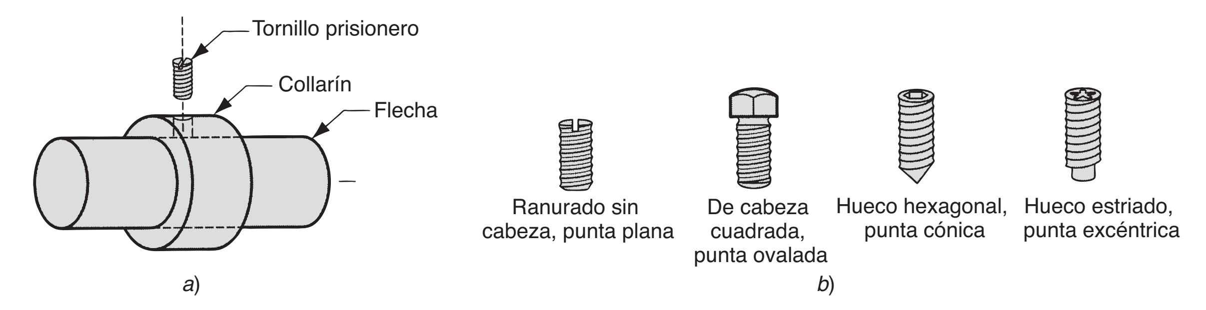
Entre los tipos de sujetadores roscados y equipo relacionado adicionales se incluyen los pernos sin cabeza, los insertos con rosca de tornillo, los sujetadores roscados prisioneros y las arandelas. Un ***perno sin cabeza*** (en el contexto de los sujetadores) es un sujetador con rosca externa, pero sin la cabeza normal que posee un perno. Los pernos sin cabeza se usan para ensamblar dos piezas mediante dos tuercas, como se muestra en la figura 33.5 *a*). Están disponibles con roscas en un extremo o en ambos, como en la figura 33.5 *b*) y *c*).

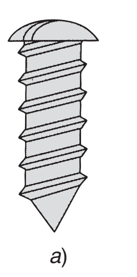
Los ***insertos con rosca de tornillo*** son machos con rosca interna o rollos de alambre hechos para insertarse en un orificio sin rosca y para aceptar un sujetador con rosca externa. Se ensamblan en materiales más débiles (por ejemplo, plástico, madera y metales ligeros tales como el magnesio) para proporcionar roscas fuertes. Hay muchos diseños de insertos con tornillo de rosca; en la figura 33.6 se ilustra un ejemplo. Después del subsecuente ensamble del tornillo dentro del inserto, el cañón del inserto se expande hacia los lados del orificio, asegurando el ensamble.

Los ***sujetadores roscados prisioneros*** son sujetadores con rosca que se han preensamblado de manera permanente a una de las piezas que se van a unir. Los procesos de ensamblado posibles incluyen la soldadura por fusión, la soldadura dura, el ajuste en prensa o el formado en frío. En la figura 33.7 se ilustran dos tipos de sujetadores roscados prisioneros.

Una ***arandela*** es un componente de equipo que se usa con frecuencia en los sujetadores roscados para asegurar la firmeza de la unión mecánica; en su forma más simple, es un anillo delgado plano de lámina metálica. Las arandelas tienen varias funciones: 1) distribuir los esfuerzos que de otra forma se concentrarían en la cabeza del perno o tornillo y en la tuerca, 2) dar apoyo para orificios con separaciones grandes en las piezas ensambla-

FIGURA 33.3 *a*) Ensamble de un collarín a una flecha usando un tornillo prisionero y *b*) diversas geometrías de tornillos prisioneros (tipos de cabeza y punta).





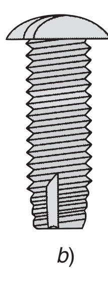


FIGURA 33.4 Tornillos autorroscantes *a*) para formado de rosca y *b*) para corte de rosca.

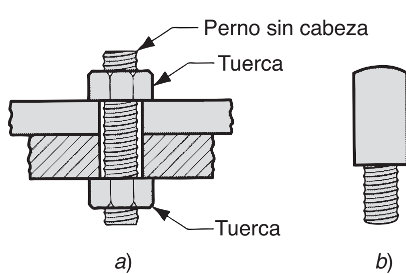
das, 3) aumentar la tensión del resorte, 4) proteger las superficies de las piezas, 5) sellar la unión y 6) resistir el aflojamiento inadvertido [14]. En la figura 33.8 se ilustran varios tipos de arandelas.

33.1.3 Esfuerzos y resistencias en las uniones con pernos

Los esfuerzos comunes que actúan sobre una unión atornillada pueden ser tanto de tensión como de corte, según se muestra en la figura 33.9. En el esquema aparece un ensamble de perno y tuerca. Una vez apretado, el perno se carga bajo tensión y las piezas se cargan en compresión. Además, las fuerzas pueden actuar en direcciones opuestas en las piezas, lo que produce un esfuerzo de corte en la sección transversal del perno. Por último, se aplican esfuerzos en las roscas a lo largo de la unión, con la tuerca en una dirección paralela al eje del perno. Estos esfuerzos de corte pueden hacer que se ***barran*** las roscas (esta falla también ocurre en las roscas internas de la tuerca).

La resistencia de un sujetador roscado generalmente se especifica mediante dos medidas: 1) la resistencia a la tensión, que tiene la definición tradicional y 2) la resistencia de prueba. En general, la ***resistencia de prueba*** equivale a la resistencia permitida; en forma precisa, es la tensión máxima que permite un sujetador roscado externamente sin una deformación permanente. Los valores típicos de resistencias de tensión y de prueba para pernos de acero se dan en la tabla 33.2.

El problema que puede surgir durante el ensamble es que los sujetadores roscados se aprieten en exceso, lo cual provoca esfuerzos que exceden la resistencia del material del sujetador. Si se supone un ensamble de perno y tuerca como el que se muestra en la figura 33.9, la falla puede ocurrir en alguna de las siguientes formas: 1) barrido de las roscas externas (por ejemplo, en el perno o en el tornillo), 2) barrido de las roscas internas (por ejemplo, en la tuerca), o 3) ruptura del perno debido a un esfuerzo de tensión excesivo en su área de sección transversal. En el barrido de la rosca, las fallas 1 y 2, es una falla de corte que ocurre cuando la longitud de la unión es muy corta (menos de 60% del diámetro nominal del perno). Esto puede evitarse al proporcionar una unión de rosca adecuada en el diseño del sujetador. La falla de tensión 3) es el problema más común. El perno se rompe cuando llega a 85% de su resistencia de tensión, debido a la combinación de esfuerzos de tensión y de torsión durante el apretado [2].



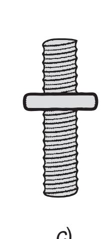


FIGURA 33.5 *a*) Perno sin cabeza y tuercas usadas para ensamble. Otros tipos de pernos sin cabeza, *b*) con rosca en un solo extremo y *c*) con rosca en los dos extremos.

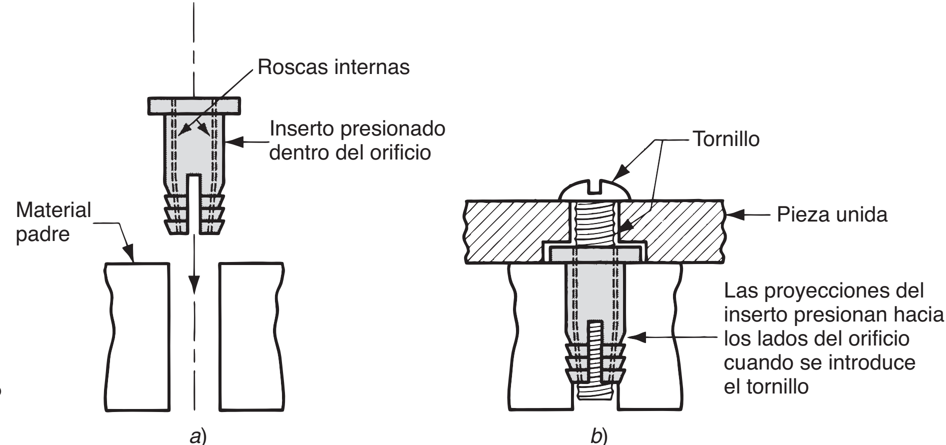


FIGURA 33.6 Insertos con rosca de tornillo: *a*) antes de la inserción y *b*) después de la inserción en un orificio y luego de haber girado el tornillo dentro del inserto.

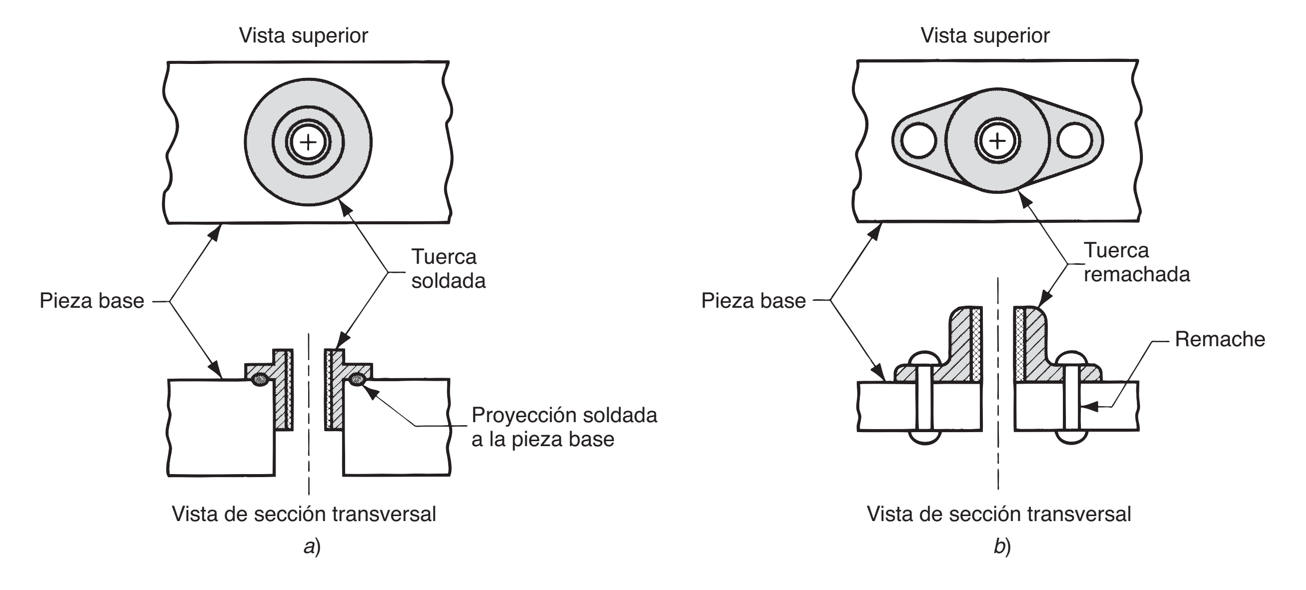
El esfuerzo de tensión al que está sujeto un perno se calcula como la carga de tensión aplicada a la unión, dividida entre el área aplicable:

$$\sigma = \frac{F}{A_s} \tag{33.1}$$

donde σ = esfuerzo, MPa (lb/in^2); F = carga, en N (lb); y A_s = área de esfuerzo en tensión, mm^2 (in^2). Este esfuerzo de tensión se compara con los valores de resistencia del perno enlistados en la tabla 33.2. El área de esfuerzo de tensión para el sujetador roscado es el área de sección transversal de la sección roscada y se calcula directamente de una de las siguientes ecuaciones [2], dependiendo de si el perno está en el estándar métrico o en el de Estados Unidos. Para el estándar métrico (ISO), la fórmula es

$$A_s = \frac{\pi}{4}(D - 0.9382p)^2 \tag{31.2}$$

FIGURA 33.7 Sujetadores roscados prisioneros: *a*) tuerca soldada y *b*) tuerca remachada.



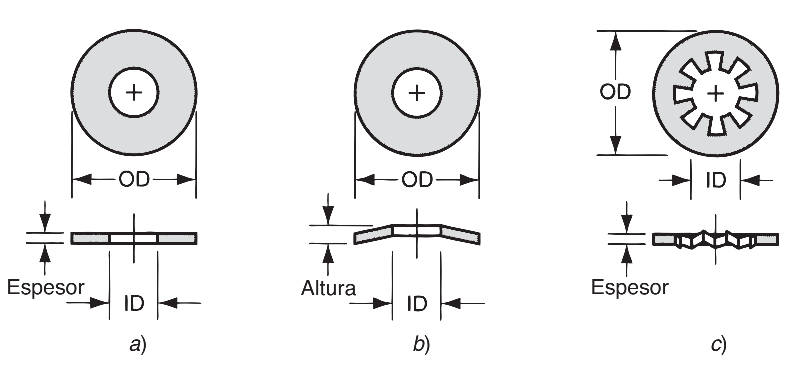


FIGURA 33.8 Tipos de arandelas: *a*) arandelas simples (planas); *b*) arandelas de resorte, usadas para amortiguar la vibración o compensar el desgaste y *c*) arandela de seguridad, diseñada para resistir el aflojamiento del perno o el tornillo.

donde D = tamaño nominal (diámetro principal básico) del perno o el tornillo, mm; y p = el paso de la rosca, mm. Para la norma estadounidense (ANSI), la fórmula es

$$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{0.9743}{n}\right)^2 \tag{33.1}$$

donde D = tamaño nominal (diámetro principal básico) del perno o tornillo, in; y n = número de roscas por pulgada.

33.1.4 Herramientas y métodos para ensamblar sujetadores roscados

La función básica de las herramientas y métodos para ensamblar sujetadores roscados es proporcionar una rotación relativa entre las roscas externa e interna y aplicar suficiente torque para asegurar el ensamble. Las herramientas disponibles van desde desarmadores simples o llaves de tuercas manuales hasta herramientas propulsadas con sofisticados sensores eléctricos para asegurar una presión conveniente. Es importante que la herramienta coincida en estilo y tamaño con el tornillo, el perno o la tuerca, debido a que existen muchos tipos de cabezas de pernos. Por lo general, las herramientas manuales se hacen con una sola punta u hoja, pero las herramientas eléctricas están diseñadas para usar juntas intercambiables. Las herramientas propulsadas operan mediante energía neumática, hidráulica o eléctrica.

El cumplimiento del objetivo de un sujetador roscado depende en gran parte de la cantidad de torque aplicado para apretarlo. Una vez que el perno o tornillo (o tuerca) se gira hasta que se asienta contra la superficie de la pieza, la presión adicional que se aplique aumentará la cantidad de tensión en el sujetador (y simultáneamente la cantidad de compresión en las piezas que se unen); y será posible resistir el apretado mediante un torque mayor. Por lo tanto, hay una correlación entre el torque requerido para apretar el sujetador y el esfuerzo de tensión que experimenta éste. Para obtener la función deseada en la unión

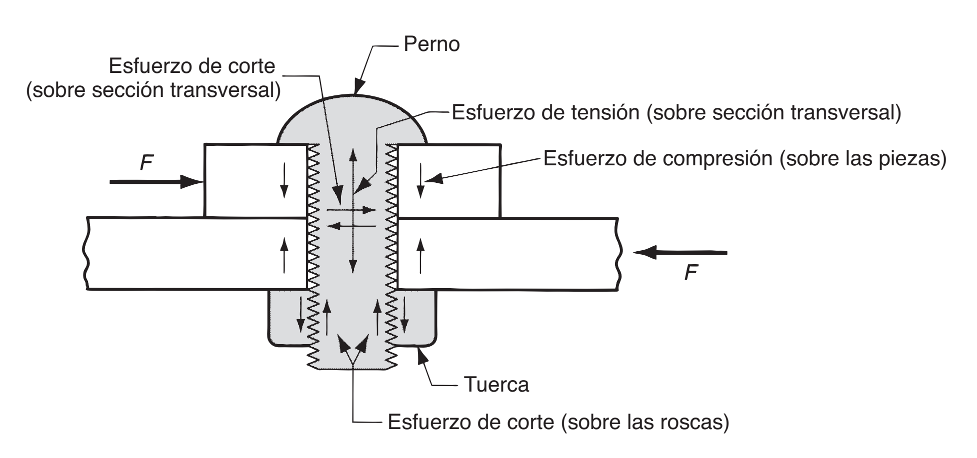


FIGURA 33.9 Esfuerzos comunes que actúan sobre una unión empernada.

Tabla 33.2 Valores típicos de esfuerzo de prueba y de tensión para pernos y tornillos de acero, los diámetros varían de 6.4 mm (0.25 in) a 38 mm (1.50 in).

	Esfuerzo de prueba		Esfuerzo de tensión	
Material	MPa	lb/in^2	MPa	lb/in^2
Acero al bajo y medio carbono	228	33 000	414	60 000
Aleación de acero	830	120 000	1030	150 000

Fuente: [14].

ensamblada (por ejemplo, para mejorar la resistencia a la fatiga) y asegurar los sujetadores roscados, el diseñador de producto con frecuencia especificará la fuerza de tensión que debe aplicarse. Esta fuerza se denomina la ***precarga***. La siguiente relación puede usarse para determinar el torque requerido a fin de obtener una precarga especificada [14]:

$$T = C_t DF \tag{33.4}$$

donde T = torque, N-mm (lb-in); C_t = el coeficiente de torque, cuyo valor típicamente varía entre 0.15 y 0.25, dependiendo de las condiciones de la superficie de la rosca; D = diámetro nominal del perno o tornillo, mm (in); y F = fuerza de tensión de precarga especificada, N (lb).

Se emplean diversos métodos para aplicar el torque requerido, que incluyen 1) la sensibilidad del operador, que no es muy preciso, pero es adecuado para la mayoría de los ensambles; 2) llaves de torque, que miden el torque conforme el sujetador gira; 3) motores de detención súbita, que son llaves de tuercas motorizadas diseñadas para detenerse repentinamente cuando se alcanza el torque requerido; y 4) apretado por giro de torque, donde el sujetador se aprieta al principio de la operación a un nivel de torque bajo y después se rota una cantidad adicional especificada (por ejemplo, un cuarto de vuelta).

33.2 REMACHES Y OJILLOS

Los remaches son sujetadores que se utilizan ampliamente para obtener una unión permanente sujetada en forma mecánica. La aplicación de remaches es un método de sujeción que ofrece altas velocidades de producción, simplicidad, confiabilidad y bajo costo. A pesar de estas aparentes ventajas, su aplicación ha declinado en décadas recientes, a favor de los sujetadores roscados, la soldadura y el pegado adhesivo. La aplicación de remaches se usa como uno de los procesos de sujeción primordiales en las industrias aeronáutica y aeroespacial para unir el fuselaje a canales y otros elementos estructurales.

Un ***remache*** es una punta con cabeza y sin rosca que se usa para unir dos (o más) piezas al pasar el pasador a través de orificios en las piezas y después formar (recalcar) una segunda cabeza en la punta del lado opuesto. La operación de deformación se ejecuta en caliente o en frío (trabajo en caliente o trabajo en frío), y utiliza el martilleo o presión estable. Una vez deformado, el remache no puede removerse, a menos que una de las cabezas se rompa. Los remaches se especifican por su longitud, diámetro, cabeza y tipo. El tipo de remache se refiere a las cinco configuraciones geométricas básicas que afectan la manera en que éste se recalcará para formar la segunda cabeza. Los cinco tipos básicos son: *a*) sólido, *b*) tubular, *c*) semitubular, *d*) bifurcado y *e*) de compresión, y se ilustran en la figura 33.10. Además, existen remaches especiales para aplicaciones específicas.

Los remaches se usan primordialmente para uniones superpuestas. El orificio de separación donde se inserta el remache debe tener un diámetro cercano al del remache. Si el orificio es demasiado pequeño, será difícil insertar el remache, lo que reducirá la velocidad de producción. Si el orificio es muy grande, el remache no llenará el orificio y puede doblarse durante la formación de la cabeza en el lado contrario. Existen tablas de diseño para remaches en las que se especifican los tamaños de orificio óptimos.

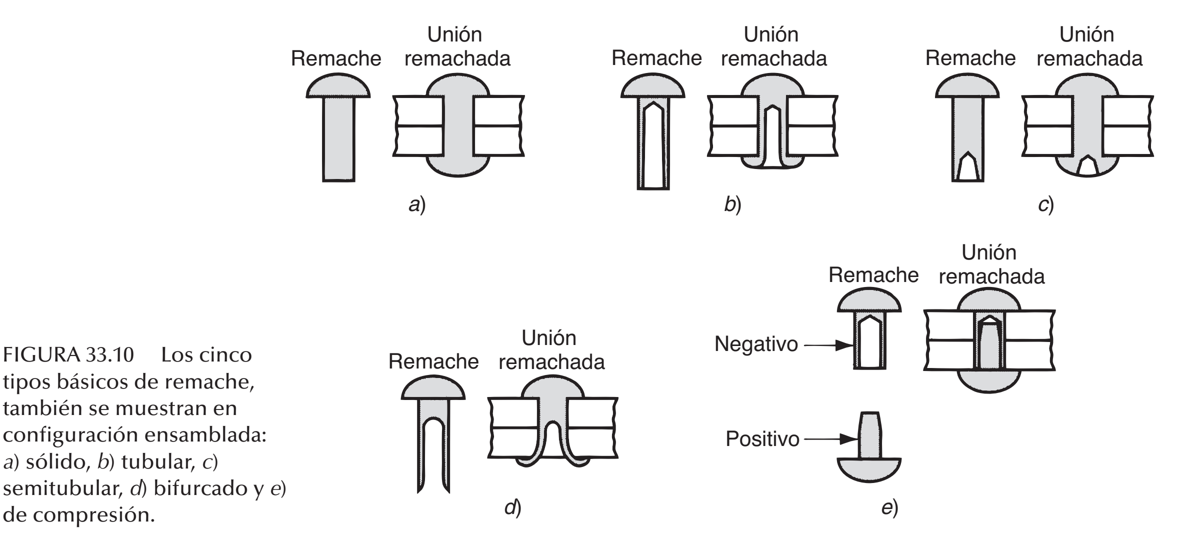


FIGURA 33.10 Los cinco tipos básicos de remache, también se muestran en configuración ensamblada: *a*) sólido, *b*) tubular, *c*) semitubular, *d*) bifurcado y *e*) de compresión.

Las herramientas y los métodos usados en la aplicación de remaches se dividen en las siguientes categorías: 1) por impacto, en el cual un martillo neumático realiza golpes sucesivos para recalcar el remache; 2) de compresión uniforme, en el cual la herramienta para aplicar el remache efectúa una presión continua para recalcar el remache y 3) una combinación de impacto y compresión. Mucho del equipo usado para aplicar remaches es portátil y de operación manual. Existen máquinas automáticas para taladrar y remachar, las cuales preparan los orificios y después insertan y recalcan los remaches.

Los ***ojillos*** son sujetadores tubulares de pared delgada con un reborde en un extremo, y generalmente están hechos de lámina metálica, como en la figura 33.11 *a*). Se usan para producir una unión empalmada permanente entre dos (o más) piezas planas. Los ojillos se sustituyen con remaches en aplicaciones de baja tensión para ahorrar material, peso y costos. Durante la sujeción, el ojillo se inserta a través de orificios en las piezas y el extremo recto se dobla para asegurar el ensamble. La operación de formado se denomina ***calcado*** y se ejecuta mediante herramientas opuestas que sostienen al ojillo en posición y doblan la pieza que sobresale de su cañón. En la figura 33.11 *b*) se ilustra la secuencia para el diseño de un ojillo típico. Las aplicaciones de este método de sujeción incluyen los subensambles automotrices, componentes eléctricos, juguetes y ropa.

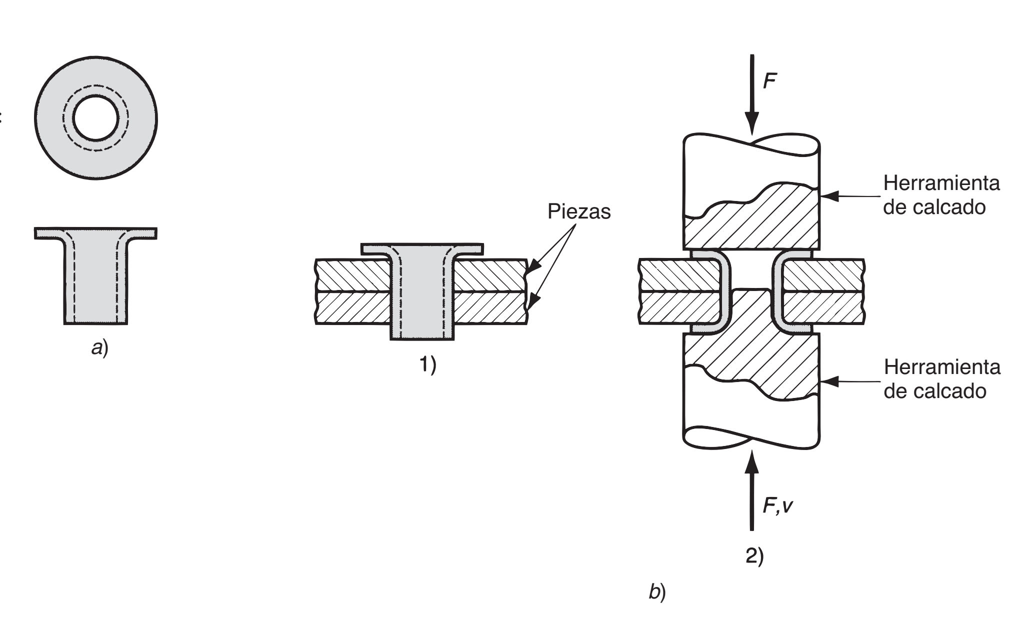


FIGURA 33.11 Sujeción con un ojillo; *a*) ojillo y *b*) secuencia de ensamble: 1) inserción del ojillo en el orificio y 2) operación de calcado.

33.3 MÉTODOS DE ENSAMBLE BASADOS EN AJUSTES POR INTERFERENCIA

Varios métodos de ensamble se basan en la interferencia mecánica entre dos piezas coincidentes que se van a unir. Esta interferencia, ya sea durante el ensamble o después de que se unen las piezas, es lo que las mantiene juntas. Los métodos incluyen el ajuste con prensa, dispositivos de ajuste por contracción y expansión, dispositivos de ajuste automático y anillos de retención.

Ajuste con prensa Un ensamble de ajuste con prensa es aquel donde los dos componentes tienen un dispositivo de ajuste por interferencia entre ellos. El caso típico es cuando un pasador (por ejemplo, un pasador cilíndrico recto) de cierto diámetro se presiona dentro de un orificio de un diámetro ligeramente menor. Se fabrican pasadores estándar de distintos tamaños para realizar diversas funciones, como: 1) localizar y asegurar los componentes, usados para aumentar los sujetadores roscados por medio de la sujeción de dos (o más) piezas en alineaciones fijas entre sí, 2) servir de puntos pivote, para permitir la rotación de un componente en relación con el otro y 3) como pasadores de corte. A excepción de 3), normalmente los pasadores se endurecen. Los pasadores de corte están hechos de metales más suaves, de modo que se rompan bajo una carga de corte repentina o severa para salvar al resto del ensamble. Otras aplicaciones del ajuste con prensa incluyen el ensamble de collarines, engranes, poleas y componentes similares en flechas.

Las presiones y esfuerzos en un ajuste de interferencia pueden estimarse mediante varias fórmulas aplicables. Si el ajuste consiste en un pasador o una flecha sólida y redonda dentro de un collarín (o un componente semejante), como se muestra en la figura 33.12, y los componentes están hechos del mismo material, la presión radial entre el pasador y el collarín puede determinarse por medio de [14]:

$$p_f = \frac{Ei(D_c^2 - D_p^2)}{D_p D_c^2} \tag{33.5}$$

donde p_f = presión radial o de ajuste por interferencia, MPa (lb/in^2); E = módulo de elasticidad para el material, i = interferencia entre el pasador (o flecha) y el collarín; esto es, la diferencia inicial entre el diámetro interior del orificio del collarín y el diámetro exterior del pasador, mm (in); D_c = diámetro externo del collarín, mm (in); y D_p = diámetro del pasador o flecha, mm (in).

El esfuerzo máximo efectivo ocurre en el diámetro interno del collarín y se calcula mediante

$$\text{Máx } \sigma_e = \frac{2p_f D_c^2}{D_c^2 - D_p^2} \tag{33.6}$$

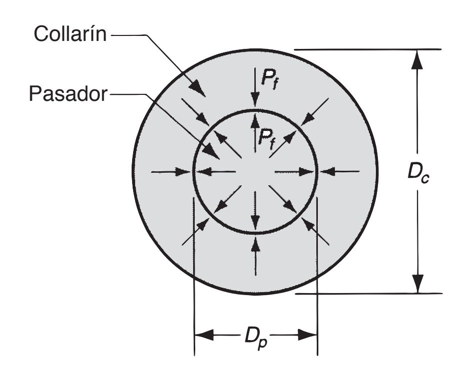


FIGURA 33.12 Sección transversal de un pasador o flecha sólida ensamblada a un collarín mediante un ajuste de interferencia.

donde Máx σ_e = el esfuerzo máximo efectivo, MPa (lb/in^2); y p_f es la presión de ajuste por interferencia calculada de la ecuación (33.5).

En situaciones donde una flecha o pasador recto se presiona dentro del orificio de una pieza grande con una forma diferente a la del collarín, pueden alterarse las ecuaciones anteriores si se considera el diámetro externo D_c como infinito, por lo que la ecuación para la presión por interferencia se reduce a

$$p_f = \frac{Ei}{D_p} \tag{33.7}$$

y el esfuerzo máximo efectivo correspondiente se convierte en

$$\text{Máx } \sigma_e = 2p_f \tag{33.8}$$

En la mayoría de los casos, en particular para metales dúctiles, el esfuerzo máximo efectivo debe compararse con la resistencia a la fluencia del material, aplicando un factor de seguridad apropiado, como en la ecuación siguiente:

$$\text{Máx } \sigma_e \leq \frac{Y}{SF} \tag{33.9}$$

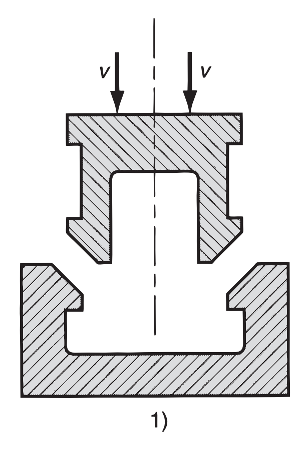
donde Y = resistencia a la fluencia del material y SF es el factor de seguridad aplicable.

Existen diferentes formas de pasador para los ajustes con dispositivos de interferencia. El tipo básico es un ***pasador recto***, generalmente hecho de alambre o barras de acero al carbono estirado en frío que varía en diámetro de 1.6 a 25 mm (1/16 a 1.0 in). No tienen conexión a tierra, y poseen extremos biselados o cuadrados (los extremos biselados facilitan el ajuste con prensa). Los ***pasadores en bisel*** se fabrican con especificaciones más precisas que los pasadores rectos y pueden conectarse a tierra y endurecerse. Se usan para fijar la aleación de componentes ensamblados en troqueles, instalaciones fijas y maquinaria. Los ***pasadores ahusados*** poseen un ahusamiento de 6.4 mm (0.25 in) por pie y se introducen en el orificio para establecer una posición relativa fija entre las piezas. Su ventaja es que pueden sacarse del orificio con facilidad.

Existen otras formas geométricas adicionales de pasadores disponibles comercialmente, incluidos los ***pasadores con surcos***, rectos, sólidos, con tres surcos longitudinales en los cuales el metal se levanta en algún lado de cada surco para provocar interferencia cuando éstos se presionan dentro del orificio; ***pasadores moleteados*** los cuales tienen un patrón moleteado que produce interferencia en el orificio correspondiente; y ***pasadores enrollados***, también llamados ***pasadores en espiral***, que están hechos de materia prima en tiras enroscadas dentro de un resorte enrollado.

Ajustes por contracción y expansión Estos términos hacen referencia al ensamble de dos piezas que tienen un ajuste por interferencia a temperatura ambiente. El caso típico es un pasador o flecha cilíndrica ensamblada dentro de un collarín. Para ensamblar con ***ajuste por contracción***, se calienta la pieza externa para agrandarla mediante expansión térmica y la parte interna permanece a temperatura ambiente o se enfría para contraer su tamaño. Posteriormente se ensamblan las piezas y se devuelven a la temperatura ambiente para que la pieza externa se encoja, y si se enfría previamente, la pieza interna se expande para formar un ajuste por interferencia fuerte. El ***ajuste por expansión*** ocurre cuando sólo la pieza interna se enfría y se contrae para un ensamble; una vez que se inserta en el componente correspondiente, se calienta a temperatura ambiente, expandiéndola para crear el ensamble por interferencia. Estos métodos de ensamble se usan para ajustar engranes, poleas, mangas y otros componentes sobre flechas sólidas y huecas.

Para obtener el calentamiento o enfriamiento de las piezas de trabajo se usan varios métodos. El equipo incluye sopletes, hornos, calentadores por resistencia eléctrica y calentadores por inducción eléctrica. Los métodos de enfriamiento incluyen la refrigeración convencional, el empacado en hielo seco y la inmersión en líquidos fríos, incluido el



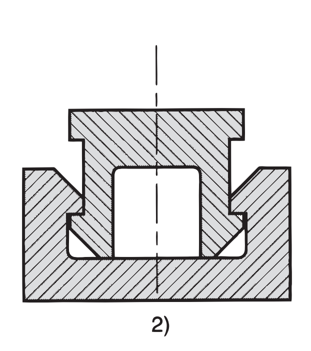


FIGURA 33.13 Ensamble de ajuste automático en el que se muestran secciones transversales de dos piezas que coinciden: 1) antes del ensamble y 2) piezas entrelazadas.

nitrógeno líquido. El cambio de diámetro resultante depende del coeficiente de expansión térmica y de la diferencia de temperatura que se aplica a la pieza. Si se supone que el calentamiento o enfriamiento se produjo a una temperatura uniforme durante todo el trabajo, el cambio en el diámetro está dado por

$$D_2 - D_1 = \alpha D_1(T_2 - T_1) \tag{33.10}$$

donde α = el coeficiente de expansión térmica lineal, en mm/mm-°C (in/in-°F) para el material (véase la tabla 4.1); T_2 = la temperatura a la cual se han calentado o enfriado las piezas, en °C (°F); T_1 = temperatura ambiente inicial; D_2 = diámetro de la pieza en T_2, mm (in); y D_1 = diámetro de la pieza en T_1.

Las ecuaciones de la (33.5) a la (33.9) para calcular presiones de interferencia y esfuerzos efectivos pueden usarse para determinar los valores correspondientes para los ajustes por contracción y expansión.

Ajustes automáticos y anillos de retención Los ajustes automáticos son una modificación de los ajustes por interferencia. Un ***ajuste automático*** implica la unión de dos piezas, en las cuales los elementos que coinciden poseen una interferencia temporal mientras se presionan juntos, pero una vez que se ensamblan se entrelazan para conservar el ensamble. En la figura 33.13 se muestra un ejemplo típico: a medida que las piezas se presionan juntas, los elementos que coinciden se deforman elásticamente para alojar la interferencia y después permiten que las piezas se ajusten de manera automática; una vez en posición, los elementos se conectan mecánicamente de modo que no se desensamblan con facilidad. Por lo general, las piezas se diseñan para que sólo exista una ligera interferencia después del ensamble.

Las ventajas del ajuste automático incluyen que: 1) las piezas pueden diseñarse con características de autoalineación, 2) no se requieren herramientas especiales y 3) el ensamble puede realizarse con mucha rapidez. Originalmente, el ajuste automático se concibió como un método que sería conveniente para aplicaciones robóticas industriales; sin embargo, no es sorprendente que las técnicas de ensamble que resultan más fáciles para los robots también lo sean para las personas que trabajan en el ensamblado.

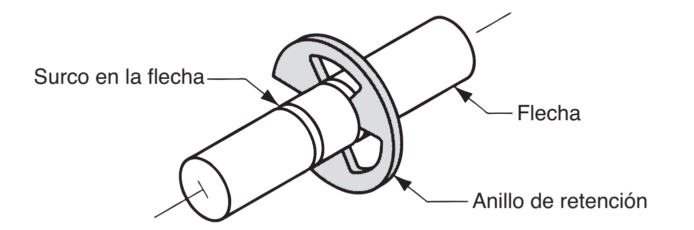


FIGURA 33.14 Anillo de retención ensamblado en un surco sobre una flecha.

Un ***anillo de retención,*** también conocido como ***anillo de mordaza,*** es un sujetador que se agarra a presión dentro de un surco que traza una circunferencia sobre una flecha o tubo para formar un hombro, como se ilustra en la figura 33.14. El ensamble puede usarse para ubicar o limitar el movimiento de piezas montadas sobre la flecha. Existen anillos de retención para aplicaciones externas (flechas) e internas (perforaciones). Están hechos de láminas metálicas o de alambres sometidos a tratamiento térmico para obtener dureza y rigidez. A fin de ensamblar un anillo de retención se usan pinzas especiales para deformar elásticamente el anillo de modo que se ajuste sobre la flecha (o dentro de la perforación) y después se libera dentro del surco.

33.4 OTROS MÉTODOS DE SUJECIÓN MECÁNICA

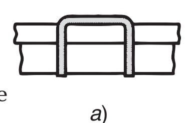
Además de las técnicas de sujeción mecánica analizadas con anterioridad, existen varios métodos adicionales que implican el uso de sujetadores. Éstos incluyen el puntillado, el engrapado, el cosido y las clavijas.

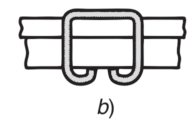
Puntillado, engrapado y cosido El puntillado y el engrapado industriales son operaciones similares que implican el uso de sujetadores metálicos en forma de U. El ***puntillado*** es una operación de sujeción en la cual se usa una máquina que produce, una por una, las puntillas en forma de U de alambre de acero, y de inmediato las inserta a través de las dos piezas que se van a unir. En la figura 33.15 se ilustran varios tipos de puntillado de alambre. Las piezas que se van a unir deben ser relativamente delgadas y consistentes con el tamaño de la puntilla; el ensamble puede implicar varias combinaciones de materiales metálicos y no metálicos. Las aplicaciones del puntillado industrial incluyen el ensamble de láminas metálicas ligeras, bisagras metálicas, conexiones eléctricas, encuadernación de revistas, cajas de cartón corrugado y empaque final de productos. Las condiciones que favorecen al puntillado en estas aplicaciones son la alta velocidad de la operación, la eliminación de orificios prefabricados en las piezas y sujetadores que rodeen las piezas.

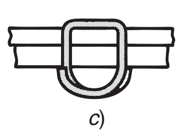
En el ***engrapado*** se clavan grapas en forma de U a través de las dos piezas que se van a unir. Las grapas se proporcionan en tiras convenientes. Las grapas individuales se pegan ligeramente juntas para formar la tira, pero la engrapadora las separa antes de colocarlas. Las grapas se fabrican con diferentes estilos de puntas para facilitar su entrada en el trabajo. Por lo general, las grapas se aplican mediante pistolas neumáticas portátiles que contienen tiras con varios cientos de grapas. Las aplicaciones del engrapado industrial incluyen los muebles y la tapicería, el ensamble de asientos de automóviles y diversos trabajos de ensamble con láminas metálicas de calibre ligero y plásticos.

El ***cosido*** es un método común de unión para piezas suaves y flexibles como telas y piel. El método implica el uso de un cordón o hilo largo entrelazado con las piezas para producir una costura continua entre ellas. El proceso se usa extensamente en la industria para ensamblar ropa.

Clavijas Las ***clavijas*** son sujetadores formados de alambre con una mitad redonda en un pasador único de dos vástagos, como en la figura 33.16. Su diámetro varía entre 0.8 mm (0.031 in) y 19 mm (0.75 in), y tienen diversos estilos de punta, varios de los cuales se muestran en la figura. Las clavijas se insertan en los huecos de las piezas que coinciden y sus extremidades se separan para fijar el ensamble. Se usan para asegurar piezas en flechas y para aplicaciones similares.







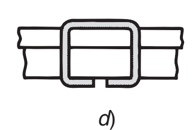


FIGURA 33.15 Tipos comunes de puntillas de alambre: *a*) sin amarre, *b*) de lazo estándar, *c*) de lazo desviado, y *d*) de amarre plano.

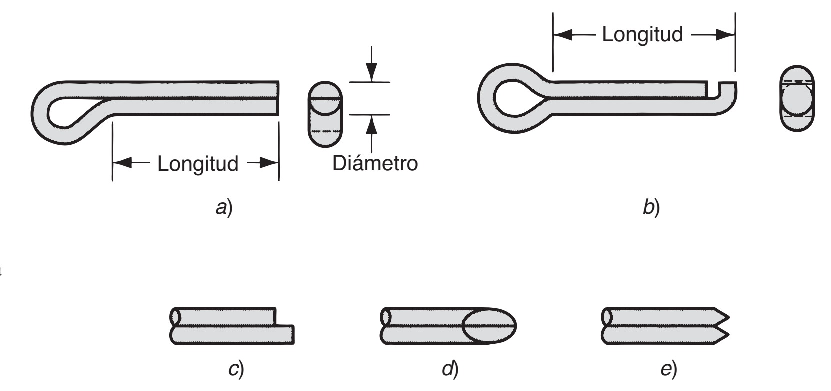


FIGURA 33.16 Clavijas: *a*) de cabeza ladeada, punta estándar; *b*) de cabeza simétrica, de punta asegurada; *c*) de punta cuadrada; *d*) de punta ovalada y *e*) de punta de cincel.

33.5 INSERTOS EN MOLDEADO Y SUJETADORES INTEGRALES

Estos métodos de ensamble forman una unión permanente entre las piezas mediante el formado o reformado de uno de los componentes a través de un proceso de manufactura tal como la fundición, el moldeado o el formado de láminas metálicas.

Insertos en moldeados y fundiciones Este método implica la colocación de un componente dentro de un molde antes del moldeado de plásticos o la fundición de metales, para que se convierta en una pieza permanente e integral del moldeado o de la fundición. Se prefiere insertar un componente separado en lugar de moldear su forma si el inserto tiene ciertas propiedades (por ejemplo, resistencia) que son superiores a las del material moldeado o fundido, o si la forma obtenida mediante el uso del inserto es demasiado compleja o intrincada para incorporarla en el molde. Los ejemplos de insertos en piezas moldeadas o fundidas incluyen los bujes y tuercas con rosca interna, los pernos prisioneros, los cojinetes y los contactos eléctricos con rosca externa. Algunos de ellos se ilustran en la figura 33.17. Los insertos con rosca interna deben colocarse dentro del molde con chavetas roscadas para evitar que el material de moldeo fluya dentro del orificio roscado.

La colocación de insertos dentro de un molde tiene ciertas desventajas en la producción [8]: 1) el diseño del molde se vuelve más complicado; 2) el manejo y la colocación del inserto dentro de la cavidad requiere tiempo, lo que reduce la tasa de producción; y 3) los insertos introducen un material ajeno a la fundición o moldeado y, en el caso de un defecto, el metal fundido o el plástico no puede recuperarse ni reciclarse con facilidad. A pesar de estas desventajas, el uso de insertos es frecuentemente el diseño más funcional y el método de producción de menor costo.

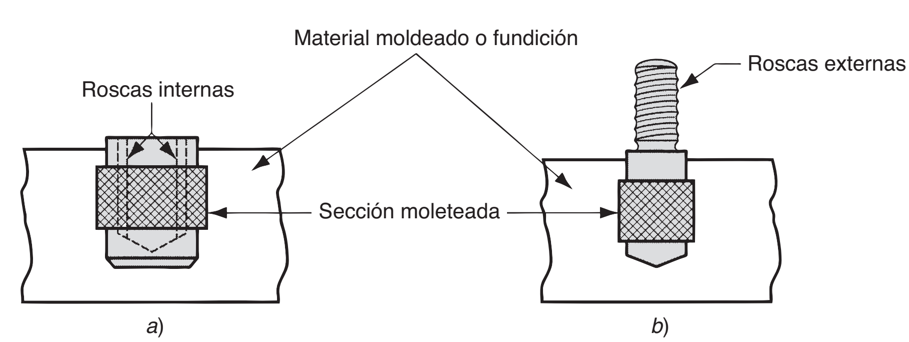


FIGURA 33.17 Ejemplos de insertos moldeados: *a*) cojinete roscado y *b*) perno sin cabeza roscado.

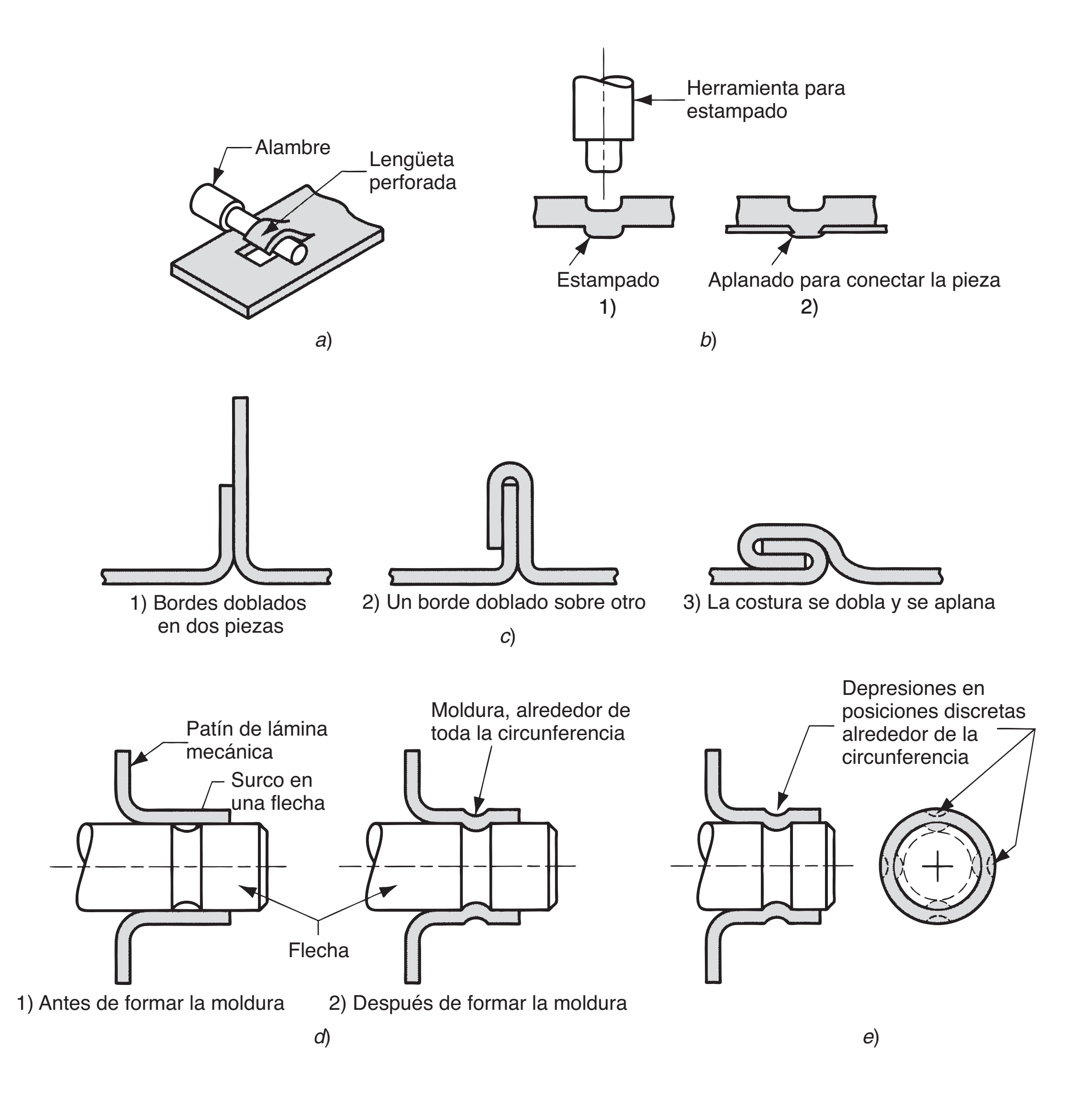


FIGURA 33.18 Sujetadores integrales: *a*) lengüeta perforada para conectar alambres o flechas a láminas metálicas, *b*) protuberancias estampadas similares al remachado, *c*) costura de agarre único, *d*) formación de molduras y *e*) formación de depresiones. Los números entre paréntesis indican una secuencia en *b*), *c*) y *d*).

Sujetadores integrales Los ***sujetadores integrales*** implican la deformación de partes de los componentes para que éstos se entrelacen y así crear una unión sujeta en forma mecánica. Este método de ensamble es más común para piezas de lámina metálica. Las posibilidades que muestra la figura 33.18 incluyen: *a*) ***lengüetas perforadas*** para conectar alambres o flechas a piezas de lámina metálica; *b*) ***protuberancias estampadas***, en las cuales se forman protuberancias en una pieza y se aplanan sobre la pieza ensamblada correspondiente; *c*) ***costuras***, donde los bordes de dos piezas de láminas metálicas separadas, o los bordes opuestos de la misma pieza, se doblan para formar la costura de sujeción; el metal debe ser dúctil para que sea factible el doblado; *d*) ***formación de molduras***, en la cual una pieza con forma de tubo se conecta a una flecha más pequeña (u otra pieza redonda), y el diámetro exterior se deforma para producir una interferencia alrededor de toda la circunferencia, y *e*) la ***formación de depresiones***, formación de simples indentaciones redondas en una pieza externa para que retenga una pieza interna.

El ***apretado de conectores***, en el cual los bordes de una pieza se deforman sobre un componente que coincide, es otro ejemplo de ensamble integral. Un ejemplo común implica apretar el cañón de una terminal eléctrica sobre un alambre (sección 36.5.1).

33.6 DISEÑO PARA ENSAMBLES

El diseño para ensambles (DFA, por sus siglas en inglés) ha recibido mucha atención en años recientes porque las operaciones de ensamble constituyen un enorme costo de mano de obra para muchas compañías de manufactura. La clave para un diseño de ensamble exitoso se plantea en términos simples [3]: 1) diseñar el producto con la menor cantidad de piezas posibles y 2) diseñar las piezas restantes para que se ensamblen con facilidad. El costo del ensamble se determina en gran parte durante el diseño de producción, debido a que en esta etapa se establece la cantidad de componentes separados en el producto y se toman decisiones acerca de cómo se ensamblarán dichos componentes. Una vez tomadas estas decisiones, se puede hacer muy poco en la manufactura para influir en los costos de ensamble (excepto, por supuesto, administrar bien las operaciones).

En esta sección se considerarán algunos de los principios que se aplican durante el diseño de productos para facilitar el ensamble. La mayoría de los principios se ha desarrollado en el contexto del ensamble mecánico, aunque algunos se aplican a otros procesos de ensamble y unión. Mucha de la investigación en el diseño para ensamble se debe al aumento en el uso de sistemas automatizados de ensamble en la industria. De acuerdo con lo anterior, el análisis se divide en dos secciones: la primera se refiere a los principios generales del DFA y la segunda se relaciona específicamente con el diseño para ensamble automatizado.

33.6.1 Principios generales del DFA

La mayoría de los principios generales se aplica tanto para el ensamble manual como para el automatizado. Su propósito es obtener la función de diseño requerida a través de los medios más sencillos y de menor costo. Se han recopilado las siguientes recomendaciones de las fuentes [1], [3], [4] y [6]:

- ***Usar la menor cantidad de piezas posible para reducir la cantidad de ensambles requeridos.*** Este principio se realiza al combinar funciones dentro de la misma pieza, que de lo contrario se obtendrían mediante componentes separados (por ejemplo, usar una pieza de plástico moldeado en lugar de un ensamble de piezas de lámina metálica).
- ***Reducir la cantidad de sujetadores roscados requeridos***. En lugar de usar sujetadores roscados separados, los componentes se deben diseñar para utilizar ajustes de agarre automático, anillos de retención, sujetadores integrales y mecanismos de sujeción similares que se obtengan con mayor rapidez. Deben usarse sujetadores roscados sólo cuando estén justificados (por ejemplo, cuando se requiera desensamble o ajuste).
- ***Estandarizar los sujetadores***. Con esto se intenta reducir la cantidad de tamaños y estilos de sujetadores requeridos en el producto. Disminuyen los problemas de hacer pedidos y de inventario, el ensamblador no tiene que distinguir entre los diversos sujetadores distintos, la estación de trabajo se simplifica y se disminuye la diversidad de herramientas de sujeción diferentes.
- ***Reducir dificultades de orientación de las piezas***. Por lo general, los problemas de orientación se reducen al diseñar piezas que sean simétricas y al minimizar la cantidad de características asimétricas. Esto permite que el manejo y la inserción sean fáciles durante el ensamble. Este principio se ilustra en la figura 33.19.
- ***Evitar las piezas que se enreden***. Ciertas configuraciones de piezas tienen mayor probabilidad de enredarse en secciones de piezas, lo que frustra a los ensambladores o

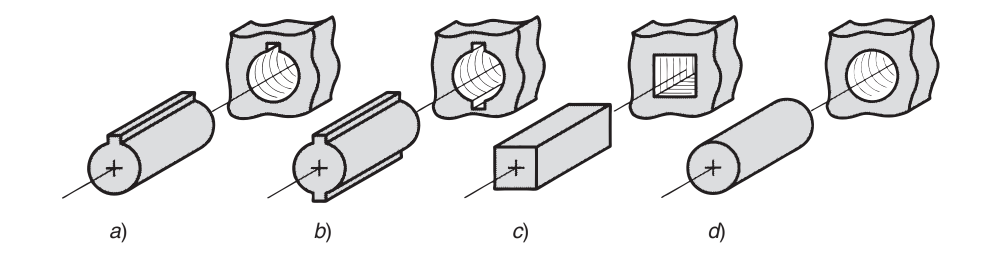


FIGURA 33.19 Por lo general las piezas simétricas son fáciles de insertar y ensamblar; *a*) sólo una orientación de rotación posible para la inserción, *b*) dos orientaciones posibles, *c*) cuatro orientaciones posibles y *d*) un número infinito de orientaciones de rotación.

atora a los alimentadores automáticos. Las piezas con ganchos, orificios, ranuras y rizos exhiben más esta tendencia que las piezas sin estas características. Véase la figura 33.20.

33.6.2 Diseño para ensamble automatizado

Los métodos convenientes para el ensamble manual no son necesariamente los mejores para el ensamble automatizado. Algunas operaciones de ensamble, que realiza con facilidad una persona, son muy difíciles de automatizar (por ejemplo, el ensamble con pernos y tuercas). Para automatizar el proceso de ensamble, deben especificarse los métodos de sujeción de piezas durante el diseño del producto que se presten para las técnicas de inserción en máquina y de unión, y que no requieran los sentidos, la destreza y la inteligencia de los trabajadores humanos de ensamble. Las siguientes son algunas recomendaciones y principios que se aplican en el diseño de productos para facilitar el ensamble automatizado [6], [11]:

- ***Usar la modularidad en el diseño de productos***. Aumentar la cantidad de tareas separadas que se realizan mediante un sistema de ensamble automatizado reducirá la confiabilidad del sistema. Para aliviar el problema de confiabilidad, Riley [11] sugiere que el diseño del producto sea modular, donde cada módulo o subensamble tenga un máximo de 12 o 13 piezas que deben producirse en un sistema de ensamble único. Asimismo, el subensamble debe diseñarse alrededor de una pieza básica a la cual se le agregan otros componentes.
- ***Reducir la necesidad de que se manejen varios componentes a la vez.*** La práctica preferida para el ensamble automatizado es separar las operaciones en estaciones diferentes, en lugar de manejar y sujetar simultáneamente varios componentes en la misma estación de trabajo.
- ***Limitar las direcciones requeridas de acceso***. Esto significa que debe reducirse el número de direcciones en las cuales se añaden componentes nuevos en el subensamble existente. En forma ideal, todos los componentes deben agregarse de manera vertical desde arriba, si esto es posible.

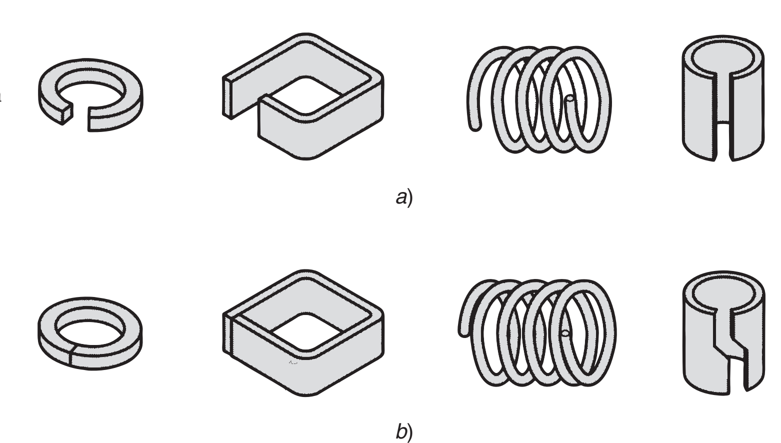


FIGURA 33.20 *a*) Piezas que tienden a enredarse y *b*) piezas diseñadas para evitar que se enreden.

➢ ***Componentes de alta calidad***. El alto desempeño de un sistema de ensamble automatizado requiere que se añadan componentes de alta calidad en forma consistente a cada estación de trabajo. Los componentes de baja calidad producen atascamientos en los mecanismos de alimentación y ensamble, por lo que provocan pérdidas de tiempo.

➢ ***Usar ajustes de agarre automático***. Esto elimina la necesidad de sujetadores roscados; el ensamble se realiza mediante la inserción simple, por lo general desde arriba. Sólo requiere que las piezas se diseñen con características positivas y negativas especiales para facilitar la inserción y la sujeción.

REFERENCIAS

[1] Andreasen, M., Kahler, S. y Lund, T., ***Design for Assembly,*** Springer-Verlag, Nueva York, 1988.

[2] Blake, A., ***What Every Engineer Should Know About Threaded Fasteners,*** Marcel Dekker, Nueva York, 1986.

[3] Boothroyd, G., Dewhurst, P. y Knight, W., ***Product Design for Manufacture and Assembly,*** Marcel Dekker, Nueva York, 1994.

[4] Bralla, J. G. (editor en jefe), ***Design for Manufacturability Handbook,*** 2a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[5] Dewhurst, P. y Boothroyd, G., "Design for Assembly in Action". ***Assembly Engineering,*** enero de 1987, pp. 64-68.

[6] Groover, M. P., ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing,*** 2a. ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. J., 2001.

[7] Groover, M. P., Weiss, M., Nagel, R. N. y Odrey, N. G., ***Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications,*** McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1986.

[8] Laughner, V. H. y Hargan, A. D., ***Handbook of Fastening and Joining of Metal Parts,*** McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1956.

[9] Nof, S. Y., Wilhelm. W. E. y Warnecke, H-J., ***Industrial Assembly,*** Chapman & Hall, Nueva York, 1997.

[10] Parmley, R. O. (ed.), ***Standard Handbook of Fastening and Joining,*** 3a. ed. McGraw-Hill Company, Nueva York, 1997.

[11] Riley. F. J., ***Assembly Automation, A Management Handbook,*** 2a. ed., Industrial Press, Nueva York, 1999.

[12] Speck, J. A., ***Mechanical Fastening, Joining, and Assembly,*** Marcel Dekker, Nueva York, 1997.

[13] Whitney. D. E., ***Mechanical Assemblies,*** Oxford University Press, Nueva York, 2004.

[l4] Wick, C. y Veilleux, R. F (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handhook,*** 4a. ed., vol. IV, ***Quality Control and Assembly.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1987.

PREGUNTAS DE REPASO

33.1. ¿En qué es diferente el ensamble mecánico de los otros métodos de ensamble analizados en capítulos anteriores? (Por ejemplo, la soldadura por fusión o la soldadura dura).

33.2. ¿Cuáles son algunas razones por las que a veces los ensambles deben desarmarse?

33.3. ¿Cuál es la diferencia técnica entre un tornillo y un perno?

33.4. ¿Qué es un perno sin cabeza (en el contexto de los sujetadores roscados)?

33.5. ¿Qué es el apretado por giro de torque?

33.6. Defina la resistencia de prueba como el término aplicado a los sujetadores roscados.

33.7. ¿Cuáles son las tres formas en las que puede fallar un sujetador roscado durante el apretado?

33.8. ¿Qué es un remache?

33.9. ¿Cuál es la diferencia entre un ajuste por compresión y un ajuste por expansión en el ensamble?

33.10. ¿Cuáles son las ventajas del ajuste automático?

33.11. ¿Cuál es la diferencia entre el puntillado y el engrapado industrial?

33.12. ¿Qué son los sujetadores integrales?

33.13. Identifique algunos de los principios y directrices generales del diseño para el ensamble.

33.14. Identifique algunos de los principios y directrices generales que se aplican específicamente al ensamble automatizado.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 18 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta

vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

33.1. La mayoría de los sujetadores con rosca externa se producen mediante: *a*) el corte de las roscas, *b*) el fresado de las roscas, *c*) el uso de una tarraja, *d*) el rolado, *e*) el torneado de las roscas.

33.2. ¿Cuál de los siguientes métodos y herramientas se usa para aplicar el torque requerido con el propósito de obtener una precarga deseada de un sujetador roscado? (tres mejores respuestas): *a*) prensa de husillo, *b*) método de precarga, *c*) sensibilidad de un operador humano, *d*) ajuste automático, *e*) llaves de motor de detención súbita, *f*) llaves de torque y *g*) uso de arandelas aseguradoras.

33.3. ¿Cuáles de las siguientes son razones para usar un ensamble mecánico? (tres mejores respuestas): *a*) facilidad de ensamble, *b*) facilidad de desensamble, *c*) economías de escala, *d*) implica la fusión de las piezas base, *e*) no hay una zona afectada por el calor en las piezas base y *f*) especialización de la mano de obra.

33.4. ¿Cuáles de las siguientes son formas comunes en las que fallan los sujetadores roscados durante el apretado? (dos mejores respuestas): *a*) esfuerzos de compresión excesivos en la cabeza del sujetador debido a la fuerza aplicada por la herramienta para apretar, *b*) esfuerzos de compresión excesivos sobre el cuerpo del sujetador, *c*) esfuerzos de corte excesivos sobre el cuerpo del sujetador, *d*) esfuerzos de tensión excesivos en la cabeza del sujetador debido a la fuerza aplicada por la herramienta de apretado, *e*) esfuerzos de tensión excesivos sobre el cuerpo del sujetador y *f*) barrido de las roscas interna o externa?

33.5. La diferencia entre un ajuste por contracción y un ajuste por expansión es que en el primero la parte interna se enfría hasta una temperatura lo suficientemente baja para reducir su tamaño de ensamblado, mientras que en un ajuste por expansión la parte externa se calienta bastante para aumentar su tamaño para el ensamble: *a*) cierto, o *b*) falso.

33.6. ¿Cuál de las siguientes opciones se incluye entre las ventajas del ajuste con agarre automático? (tres mejores respuestas): *a*) los componentes pueden diseñarse con características que facilitan el acoplamiento de las piezas, *b*) facilidad de desensamble, *c*) no hay una zona afectada por el calor, *d*) no se requieren herramientas especiales, *e*) las piezas pueden ensamblarse con rapidez y *f*) la unión resultante es más fuerte que con la mayoría de los otros métodos de ensamble.

33.7. La diferencia entre el puntillado industrial y el engrapado es que los sujetadores en forma de U se forman durante el proceso del puntillado, mientras que en el engrapado los sujetadores están preformados: *a*) cierto o *b*) falso.

33.8. Desde el punto de vista del costo del ensamble, es más conveniente usar muchos sujetadores roscados pequeños en lugar de pocos sujetadores grandes para distribuir los esfuerzos con mayor uniformidad: *a*) cierto o *b*) falso.

33.9. ¿Cuáles de las siguientes se consideran buenas reglas de diseño para productos de ensamblado automatizado? (dos mejores respuestas): *a*) diseñar el ensamble con la menor cantidad de componentes posible; *b*) diseñar productos que usen pernos y tuercas cuando sea posible para permitir el desensamble; *c*) diseñar con la mayor cantidad de tipos distintos de sujetadores para obtener la máxima flexibilidad en el diseño; *d*) diseñar piezas con características asimétricas para acoplarlas con otras piezas que tengan características correspondientes (pero inversas); y *e*) limitar las instrucciones requeridas de acceso cuando se agregan componentes a la pieza base.

PROBLEMAS

Sujetadores roscados

33.1. Se va a apretar un perno de 5 mm de diámetro para producir una precarga de 250 N. Si el coeficiente de torque es de 0.23, determine el torque que debe aplicarse.

33.2. Una tuerca y un perno de 3/8-24 UNF (3/8 in en diámetro nominal, 24 roscas/in) se insertan a través de un orificio en dos placas de acero empalmadas. Se aprietan de manera que las placas se mantienen juntas con una fuerza de 1 000 lb. El coeficiente de torque es de 0.20. *a*) ¿Cuál es el torque requerido para apretarlos? *b*) ¿Cuál es el esfuerzo resultante en el perno?

33.3. Se va a girar un tornillo métrico de 10×1.5 (10 mm de diámetro, paso $p = 1.5$ mm) dentro de un orificio roscado y se apretará a 1/2 de su resistencia de prueba. De acuerdo con la tabla 33.2, la resistencia de prueba es de 830 MPa. Determine el torque máximo que debe usarse si el coeficiente de torque es de 0.18.

33.4. Un perno M16 $\times$ 2 (16 mm de diámetro, 2 mm de paso) está sujeto a un torque de 15 N-m durante el apretado. Si el coeficiente de torque es de 0.24, determine el esfuerzo de tensión en el perno.

33.5. Se va a precargar un tornillo de 1/2 in de diámetro a una fuerza de tensión de 1 000 lb. El coeficiente de torque es de 0.22. Determine el torque que se debe usar para apretar el perno.

33.6. Existen sujetadores métricos roscados en varios sistemas, dos de los cuales tienen roscas gruesas y finas (tabla 33.1). Las roscas más finas no se cortan muy profundas y como resultado tienen un área de esfuerzo de tensión más grande para el mismo diámetro nominal. *a*) Determine la precarga máxima que puede lograrse con seguridad para las roscas con paso grueso y con paso fino de un perno de 12 mm. *b*) Determine el porcentaje de incremento en la precarga de roscas finas en comparación con las roscas gruesas. Las roscas gruesas son de 12-2.0 y las roscas finas son de 12-1.5. Suponga que la resistencia de prueba para ambos pernos es de 600 MPa.

33.7. Se usa una llave de torque en un perno de 7/8-9 UNC (7/8 in de diámetro nominal, 9 roscas/in) en una planta de ensamble final de automóviles. La llave genera un torque de 70 ft-lb. Si el coeficiente de torque es de 0.17, determine el esfuerzo tensión en el perno.

33.8. El diseñador ha especificado que en cierta aplicación debe tensarse un perno de bajo carbono de 3/8-16 UNC (3/8 in de diámetro nominal, 16 roscas/in) hasta su esfuerzo de prueba de 33 000 lb/in^2 (véase la tabla 33.2). Determine el torque máximo que debe usarse si $C = 0.25$.

33.9. Se usa una llave de 300 mm de largo para apretar un perno de M20-2.5. La resistencia de prueba del perno para la aleación particular es de 380 MPa. El coeficiente de torque es de 0.21. Determine la fuerza máxima que puede aplicarse al extremo de la llave de manera que el perno no se deforme permanentemente.

33.10. Actualmente se planea un perno de acero al bajo carbono de 1-8 UNC (diámetro de 1.0 in, 8 roscas/in) para cierta aplicación. Se va a precargar a 75% de su resistencia de prueba, la cual es de 33 000 lb/in^2 (tabla 33.2). Sin embargo, este perno es demasiado grande para el tamaño de los componentes implicados y sería preferible un perno con mayor resistencia, pero más pequeño. Determine *a*) el tamaño nominal más pequeño de un perno de aleación de acero (resistencia de prueba = 120 000 lb/in^2) que podría usarse para obtener la misma precarga en los siguientes tamaños estándar UNC que usa la compañía: 1/4-20, 5/16-18, 3/8-16, 1/2-13, 5/8-11. o 3/4-10; y b) compare el torque requerido a fin de obtener la precarga para el perno original de 1 in y el perno de aleación de acero seleccionado en el inciso a, si el coeficiente de torque en ambos casos es de 0.20.

Ajustes por interferencia

33.11. Un pasador biselado hecho de acero (módulo de elasticidad de 209 000 MPa) se ajustará en una prensa dentro de un collarín de acero. El pasador tiene un diámetro nominal de 16.0 mm y el collarín tiene un diámetro externo de 27.0 mm. *a*) Calcule la presión radial y el esfuerzo máximo efectivo si la interferencia entre el diámetro externo de la flecha y el diámetro interno del collarín es de 0.03 mm. *b*) Determine el efecto de aumentar el diámetro externo del collarín a 39.0 mm en la presión radial y el esfuerzo efectivo máximo.

33.12. Un pasador hecho con una aleación de acero se ajusta con prensa dentro de un orificio en la base de una máquina grande. El orificio tiene un diámetro de 2.497 in. El pasador tiene un diámetro de 2.500 in. La base de la máquina es de 4 ft × 8 ft. La base y el pasador tienen un módulo de elasticidad de 30×10^6 lb/in^2, una resistencia a la fluencia de 85 000 lb/in^2 y una resistencia a la tensión de 120 000 lb/in^2. Determine *a*) la presión radial entre el pasador y la base y *b*) el esfuerzo máximo efectivo en la interfaz.

33.13. Se va a ajustar con prensa un engrane hecho de aluminio (módulo de elasticidad de 69 000 MPa) sobre una flecha de aluminio. El engrane tiene un diámetro de 55 mm en la base de sus dientes. El diámetro interno nominal del engrane es de 30 mm y la interferencia es de 0.10 mm. Calcule *a*) la presión radial entre la flecha y el engrane y *b*) el esfuerzo efectivo máximo en el engrane en su diámetro interno.

33.14. Se ajusta con prensa un collarín de acero dentro de una flecha de acero. El módulo de elasticidad del acero es de 30×10^6 lb/in^2. El collarín tiene un diámetro interno de 2.498 in y la flecha tiene un diámetro externo de 2.500 in. El diámetro externo del collarín es de 4.000 in. Determine *a*) la presión radial (de interferencia) en el ensamble y *b*) la tensión efectiva máxima en el collarín en su diámetro interno.

33.15. La resistencia a la fluencia de cierto metal es de 50 000 lb/in^2 y su módulo de elasticidad es de 22×10^6 lb/in^2. Se va a usar para el anillo externo de un ensamble de ajuste con prensa a una flecha concordante hecha del mismo metal. El diámetro interno nominal del anillo es de 1.000 in y su diámetro externo es de 2.500 in. Usando un factor de seguridad de 2.0, determine la interferencia máxima que debe usarse con este ensamble.

33.16. Una flecha de aluminio tiene 40.0 mm de diámetro a la temperatura ambiente (21 °C). Su coeficiente de expansión térmica es de 24.8×10^{-6} mm/mm por °C. Si debe reducirse el tamaño en 0.20 mm para que la expansión se ajuste en el orificio, determine la temperatura a la cual debe enfriarse la flecha.

33.17. Un anillo de acero tiene un diámetro interno de 30 mm y un diámetro externo de 50 mm, a temperatura ambiente (21 °C). Si el coeficiente de expansión térmica del acero es de 12.1×10^{-6} mm/mm por °C, determine el diámetro interno del anillo cuando se calienta a 500 °C.

33.18. Se va a calentar un collarín de acero a partir de la temperatura ambiente (70 °F) hasta 700 °F. Su diámetro interior es de 1.000 in y su diámetro exterior es de 1.625 in. Si el coeficiente de expansión térmica del acero es de 6.7×10^{-6} in/in por °F, determine el aumento en el diámetro del collarín.

33.19. Un cojinete para la flecha de salida de un motor de 200 hp se va a calentar con el fin de expandirlo lo suficiente para presionarlo sobre la flecha. A 70 °F el cojinete tiene un diámetro interno de 4.000 in y un diámetro externo de 7.000 in. La flecha tiene un diámetro externo de 4.004 in. El módulo de elasticidad para la flecha y el cojinete es de 30×10^6 lb/in^2 y el coeficiente de expansión térmica es de 6.7×10^{-6} in/in por °F. *a*) ¿A qué temperatura el cojinete tendrá 0.005 de separación para ajustarse a la flecha? *b*) Después de haber sido ensamblado y enfriado, ¿cuál es la presión radial entre el cojinete y la flecha? *c*) Determine el esfuerzo efectivo máximo en el cojinete.

33.20. Un collarín de acero, cuyo diámetro externo es de 3.000 in a temperatura ambiente, se va a ajustar por contracción dentro de una flecha de acero, calentando el collarín a una temperatura elevada, mientras la flecha permanece a temperatura ambiente. El diámetro de la flecha es de 1.500 in. Para facilitar el ensamble cuando se caliente el collarín a una temperatura elevada de 1 000 °F, la separación entre la flecha y el collarín debe ser de 0.007 in. Determine *a*) el diámetro

interno inicial del collarín a temperatura ambiente de manera que se satisfaga esta separación, *b*) la presión radial y *c*) el esfuerzo máximo efectivo sobre el ajuste por interferencia resultante a temperatura ambiente (70 °F). Para el acero, el módulo de elasticidad es de 30 000 000 lb/in^2 y el coeficiente de expansión térmica es de 6.7×10^{-6} in/in por °F.

33.21. Se va a insertar un pasador en un collarín usando un ajuste por expansión. La propiedades del metal del pasador y el collarín son: coeficiente de expansión térmica de 12.3×10^{-6} m/m/°C, resistencia a la fluencia de 400 MPa y módulo de elasticidad de 209 GPa. A temperatura ambiente (20 °C), los diámetros externo e interno del collarín son de 95.00 mm y 60.00 mm, respectivamente, y el pasador tiene un diámetro de 60.03 mm. El tamaño del pasador se reducirá para el ensamble dentro del collarín, mediante enfriamiento hasta una temperatura lo suficientemente baja para que exista una holgura de 0.06 mm. *a*) ¿Cuál es la temperatura a la cual debe enfriarse el pasador para el ensamble? *b*) ¿Cuál es la presión radial a temperatura ambiente después del ensamble? *c*) ¿Cuál es el factor de seguridad en el ensamble resultante?

Parte IX

Procesamiento especial y tecnologías de ensamble

34 CREACIÓN RÁPIDA DE PROTOTIPOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En esta parte del libro, se analiza una serie de tecnologías de procesamiento y ensamble que no se ajustan de manera exacta al esquema de clasificación de la figura 1.4. Son tecnologías que se han adaptado de las operaciones de manufactura y ensamble convencionales o se han desarrollado de manera improvisada para cumplir las funciones o necesidades especiales de los diseñadores y fabricantes. La creación rápida de prototipos, que se cubre en el presente capítulo, es una serie de procesos usados para fabricar un modelo, una pieza o una herramienta en el menor tiempo posible. En los capítulos 35 y 36 se analizan las tecnologías usadas en la manufactura de electrónicos, una actividad de importancia económica significativa. En el capítulo 35 se cubre el procesamiento de circuitos integrados, y en el capítulo 36 se estudia el ensamble y empaque de electrónicos. En los capítulos 37 y 38 se discuten algunas de las tecnologías usadas para producir piezas y productos muy pequeños. En el capítulo 37 se describen tecnologías de microfabricación usadas para producir artículos medidos en micras (10^{-6} m), mientras que en el capítulo 38 se analizan tecnologías de nanofabricación para producir artículos medidos en nanómetros (10^{-9} m). Los procesos cubiertos en estos cinco capítulos son relativamente nuevos. La creación rápida de prototipos data de alrededor de 1988. La producción de electrónicos moderna comenzó alrededor de 1960 (nota histórica 35.1), aunque desde entonces se han realizado avances espectaculares en el procesamiento de electrónicos. Las tecnologías de microfabricación, que se estudian en el capítulo 37, surgieron poco después de que lo hizo el procesamiento de electrónicos. Finalmente, las tecnologías de nanofabricación representan un campo emergente en la actualidad que inició en la década de 1990.

La ***creación rápida de prototipos*** (RP, por sus siglas en inglés) es una familia de métodos de fabricación para hacer prototipos de ingeniería en los tiempos de entrega mínimos posibles, con base en un modelo del artículo realizado en un sistema de diseño asistido por computadora (CAD). El método tradicional para fabricar el prototipo de una pieza es el maquinado, el cual puede requerir tiempos de entrega significativos, hasta de varias semanas, algunas veces más, dependiendo de la complejidad y la dificultad de la pieza en lo relativo a la recepción de los materiales. En la actualidad existen varias técnicas para la creación rápida de prototipos, las cuales permiten que una pieza se produzca en horas o días en lugar de en semanas, después de haber generado un modelo en computadora de la pieza en un sistema de CAD.

34.1 FUNDAMENTOS DE LA CREACIÓN RÁPIDA DE PROTOTIPOS

La necesidad especial que motiva la variedad de tecnologías para la creación rápida de prototipos surge porque los diseñadores de productos desearían tener un modelo físico del diseño de una pieza o producto nuevo en lugar de un modelo de computadora o un dibujo. La creación de un prototipo es un paso integral en el procedimiento de diseño. Un ***prototipo virtual***, que es un modelo en computadora del diseño de la pieza en un sistema de CAD, puede no resultar adecuado para que el diseñador visualice la pieza. Puede afirmarse que no es suficiente para realizar pruebas físicas reales sobre la pieza, aunque es posible ejecutar pruebas simuladas por medio del análisis de elemento finito u otros métodos. Si se usa una de las tecnologías de RP disponibles, puede crearse una pieza física sólida en un tiempo relativamente corto (horas si la compañía posee el equipo de RP o días si la fabricación de la pieza debe contratarse con una compañía externa especializada en RP). Por lo tanto, el diseñador puede examinar en forma visual y sentir físicamente la pieza y comenzar a realizar pruebas y experimentos para evaluar sus ventajas y desventajas.

Las tecnologías para la creación rápida de prototipos puede dividirse en dos categorías básicas: 1) procesos de remoción de material y 2) procesos de adición de material. La alternativa de ***RP por remoción de material*** implica maquinado (capítulo 22), primordialmente fresado y taladrado, y utiliza una máquina CNC (control numérico por computadora) que está disponible para el departamento de diseño cuando se requiere. Por supuesto, debe resolverse el problema de preparar el programa de la pieza en CN (control numérico) a partir del modelo de CAD (sección 39.1.4). Si la configuración geométrica de la pieza puede analizarse mediante un algoritmo automático de programación de la pieza en CN, entonces hay un modo de resolver el problema. Un enfoque alternativo que se utiliza con frecuencia para la creación rápida de prototipos consiste en rebanar el modelo sólido en capas delgadas que se aproximan a la forma de la pieza sólida. Después, la máquina de fresado CNC delinea la pieza capa por capa a partir de un bloque sólido de material inicial. A menudo, el material inicial es cera, la cual puede fundirse y solidificarse para su reutilización cuando el prototipo actual ya no es necesario; además, la cera es muy fácil de maquinar. También puede usarse otros materiales iniciales, como madera, plástico o metal (por ejemplo, un grado maquinable de aluminio o latón). Casi siempre, las máquinas CNC usadas para la creación rápida de prototipos son pequeñas, y a veces se utilizan los términos ***fresado de escritorio*** o ***maquinado de escritorio*** para referirse a esta tecnología. Por lo general, el tamaño máximo de los bloques iniciales en el maquinado de escritorio es de 180 mm (7 in) en la dirección x, 150 mm (6 in) en la dirección y y 150 mm (6 in) en la dirección z [2].

En este capítulo se pone un énfasis especial en las tecnologías de ***RP por adición de material***, cuyo trabajo consiste en agregar capas de material una a una para construir la pieza sólida desde abajo hasta arriba. Los materiales iniciales incluyen 1) monómeros líquidos que se curan capa por capa para convertirlos en polímeros sólidos, 2) polvos que se añaden y se pegan capa por capa y 3) hojas sólidas que se laminan para crear la pieza sólida. Además del material de inicio, lo que distingue a las diferentes tecnologías de RP por adición de material es el método para construir y agregar las capas para crear la pieza sólida. Algunas técnicas usan rayos láser para solidificar el material inicial, otras depositan un filamento de plástico suave en el contorno de cada capa, mientras que otras adhieren capas sólidas una junto a otra. Existe una correlación entre el material inicial y las técnicas de construcción de piezas, como se verá en el análisis de las tecnologías de RP.

El enfoque común para preparar las instrucciones (programa de la pieza) en todas las técnicas actuales de RP por adición de material incluye los siguientes pasos [5]:

1. ***Modelado geométrico.*** Consiste en modelar el componente en un sistema de CAD para definir el volumen que engloba. El modelado sólido es la técnica preferida porque proporciona una representación matemática completa y precisa de la forma de la pieza. Para la creación rápida de prototipos, lo más importante consiste en distinguir el interior (la masa) de la pieza de su exterior, y el modelado sólido proporciona esta distinción.

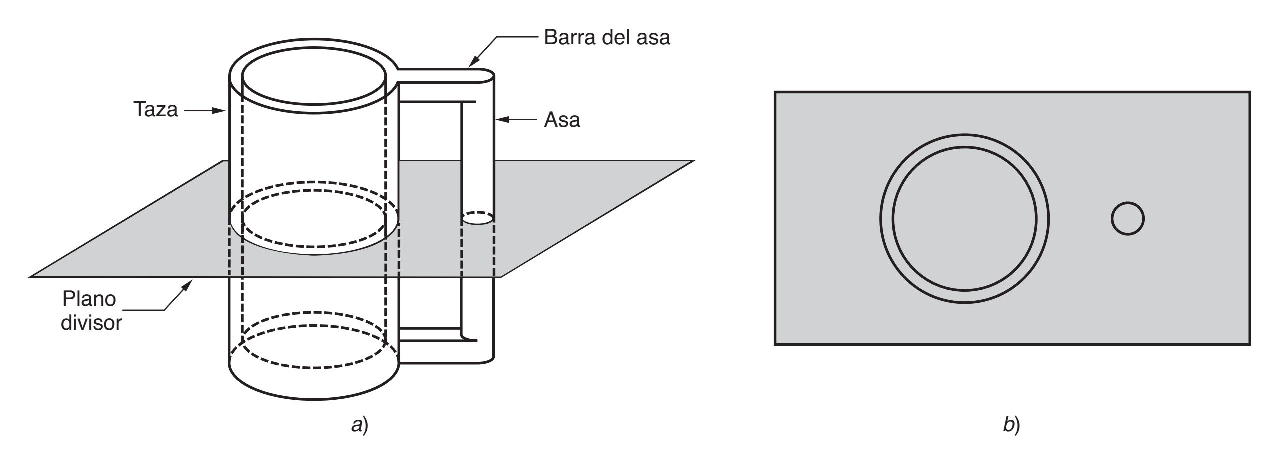


FIGURA 34.1 Conversión del modelo sólido de un objeto a capas (sólo se muestra una capa).

2. ***Teselado del modelo geométrico***.[1] En este paso, el modelo de CAD se convierte a un formato en el que sus superficies se aproximan mediante triángulos o polígonos. Los triángulos o polígonos se usan para definir la superficie, al menos de manera aproximada, y tienen sus vértices ordenados de tal manera que pueda distinguirse el interior del objeto de su exterior. El formato de teselado común que se usa en la creación rápida de prototipos es la STL,[2] que se ha convertido en la norma de facto como formato de entrada para casi todos los sistemas de RP.
3. ***División del modelo en capas***. En este paso, el modelo en formato de archivo STL se divide en capas horizontales paralelas con una separación muy estrecha. La conversión de un modelo sólido en capas se ilustra en la figura 34.1. Después, estas capas son usadas por el sistema de RP para construir el modelo físico. Por convención, las capas se forman en la orientación del plano *x-y*, y el procedimiento de creación de capas ocurre en la dirección del eje *z*. Para cada capa, se genera una trayectoria de curado, llamado el archivo STI, que es la ruta que debe seguir el sistema de RP para curar (o dicho de otra forma, solidificar) la capa.

Como lo indica el panorama de la sección, existen diferentes tecnologías para la creación rápida de prototipos por adición de materiales. Esta heterogeneidad ha producido algunos nombres alternativos para la creación rápida de prototipos, que incluyen ***manufactura por capas***, ***manufactura CAD directa*** y ***fabricación de formas libres sólidas***. El término ***creación rápida de prototipos y manufactura*** (RPM) también se está utilizando, cada vez con mayor frecuencia, para indicar que las tecnologías de RP pueden aplicarse para hacer partes del producto y fabricar herramientas para la producción, no sólo prototipos.

34.2 TECNOLOGÍAS PARA LA CREACIÓN RÁPIDA DE PROTOTIPOS

En la actualidad se han creado alrededor de 25 técnicas de RP, las cuales pueden clasificarse de diferentes maneras. Se adoptará un sistema de clasificación recomendado en [5] y que es consistente con el esquema de clasificación usado en este libro para los procesos de formado de partes (después de todo, la creación rápida de prototipos es un proceso de formado de piezas). El método de clasificación se basa en la forma del material inicial en el proceso de RP: 1) basado en líquidos, 2) basado en sólidos y 3) basado en polvos. En las siguientes tres secciones se analizan ejemplos de cada clase.

[1]De manera general, el término ***teselado*** se refiere a la demarcación o creación de un mosaico, como uno consistente en pequeños azulejos coloreados fijos a una superficie con propósitos decorativos.
[2]STL, por sus siglas en inglés, significa estereolitografía (*STereoLithografy*), una de las tecnologías primordiales usadas para la creación rápida de prototipos, creada por 3D Systems Inc.

34.2.1 Sistemas para la creación rápida de prototipos basados en líquidos

En estas tecnologías, el material base es un líquido. Alrededor de una docena de tecnologías de RP se encuentran en esta categoría; de éstas se describirán las siguientes tecnologías seleccionadas: 1) estereolitografía, 2) curado en tierra sólida y 3) manufactura por deposición a goteo.

Estereolitografía Ésta fue la primera tecnología de RP por adición de material; data de alrededor de 1988 y fue introducida por 3D Systems Inc. basada en el trabajo del inventor Charles Hull. Al momento de escribir este texto, existían más instalaciones de estereolitografía que de cualquier otra tecnología de RP. La ***estereolitografía*** (STL, también abreviada como SLA por aparato de estereolitografía) es un proceso para la fabricación de una pieza de plástico sólido, a partir de un polímero líquido fotosensible, usando un rayo láser dirigido para solidificar el polímero. La preparación general de la pieza para el proceso se ilustra en la figura 34.2. La fabricación de la parte se logra como una serie de capas, en la cual una serie se agrega sobre la capa anterior para construir gradualmente la configuración geométrica tridimensional deseada. En la figura 34.3 se ilustra una pieza fabricada por STL.

El aparato de estereolitografía consiste en 1) una plataforma que puede moverse de manera vertical dentro de un recipiente que contiene el polímero fotosensible y 2) un láser cuyo rayo puede controlarse en la dirección x-y. Al inicio del proceso, la plataforma se posiciona verticalmente cerca de la superficie del fotopolímero líquido, y un rayo láser se dirige a través de una trayectoria de curado que comprende un área correspondiente a la base (capa inferior) de la pieza. Ésta y las siguientes rutas de curado se definen mediante el archivo STI (paso 3 en la preparación de datos descrita con anterioridad). La acción del láser consiste en endurecer (curar) el polímero fotosensible en los puntos donde el rayo choca con el líquido, formando una capa sólida de plástico que se adhiere a la plataforma. Cuando se completa la capa inicial, la plataforma se baja una distancia igual al espesor de la capa y se forma una segunda capa encima de la primera por medio del láser, y así de manera sucesiva. Antes de que cada capa nueva sea curada, se pasa una cuchilla limpiadora sobre la resina líquida viscosa para asegurar que su nivel sea el mismo a través de la superficie. Cada capa tiene su propia forma de área, de manera que la sucesión de capas, cada una encima de la anterior, crea la forma de la pieza sólida. Cada capa tiene un espesor de 0.076 a 0.50 mm (0.003 a 0.020 in). Las capas más delgadas proporcionan una mejor resolución y permiten formas de piezas más intrincadas; pero el tiempo de procesamiento es mayor. Típicamente, los fotopolímeros son acrílicos [11], aunque también se ha reportado el uso de epóxicos para la STL [9]. Los líquidos iniciales son monómeros líquidos. La polimerización ocurre después de la exposición a la luz ultravioleta producida por láser de helio-cadmio

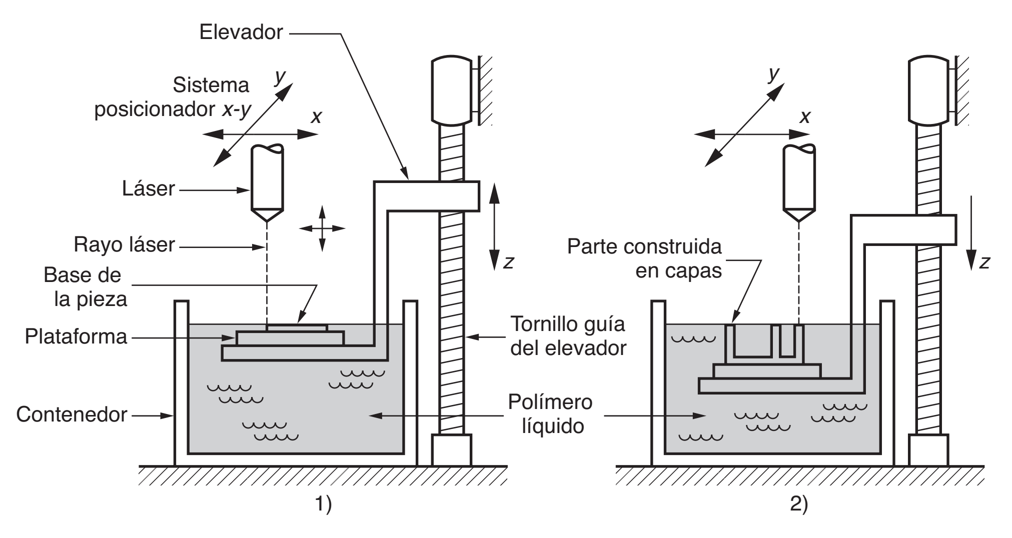


FIGURA 34.2 Estereolitografía: 1) al inicio del proceso, en el que la capa inicial se añade a la plataforma; 2) después de que se han agregado varias capas, de manera que la parte toma forma gradualmente.



FIGURA 34.3 Pieza producida por estereolitografía. (Foto cortesía de 3D Systems, Inc.).

o iones de argón. Por lo general, las velocidades de exploración de los láseres STL están entre 500 y 2 500 mm/s.

El tiempo requerido para construir la pieza mediante este proceso de creación de capas va desde una hora para piezas pequeñas de configuración geométrica simple hasta varias docenas de horas para piezas complejas. Otros factores que afectan el tiempo del ciclo son la velocidad de exploración y el espesor de las capas. El tiempo de construcción de una pieza en la estereolitografía puede estimarse al determinar el tiempo para completar cada capa y después sumar los tiempos para todas las capas. Primero, el tiempo para completar una sola capa está dado por la siguiente ecuación:

$$T_i = \frac{A_i}{vD} + T_r \tag{34.1}$$

donde T_i = tiempo para completar la capa i, en segundos, donde el subíndice i se utiliza para identificar la capa; A_i = área de la capa i, mm^2 (in^2); v = velocidad de exploración promedio del rayo láser en la superficie, mm/s (in/s); D = diámetro del rayo láser en la superficie (llamado el "tamaño del punto," el cual se supone circular), mm (in); y T_r = tiempo de reposicionamiento entre las capas, s. En el caso de la estereolitografía, el tiempo de reposicionamiento implica hacer descender la mesa de trabajo en preparación para la siguiente capa que se va a fabricar. Otras técnicas de RP requieren pasos de reposicionamiento análogo entre capas. La velocidad de exploración promedio v debe incluir cualquier efecto de las interrupciones en la trayectoria de exploración (por ejemplo, debidas a los espacios entre áreas de la pieza en una capa dada). Una vez que se han determinado los valores T_i para todas las capas, puede calcularse el tiempo del ciclo de construcción:

$$T_c = \sum_{i=1}^{n_l} T_i \tag{34.2}$$

donde T_c es el tiempo del ciclo de construcción STL, s; y n_l = el número de capas usadas para aproximar la pieza.[3]

[3]Aunque estas ecuaciones se han desarrollado aquí para la estereolitografía, pueden crearse fórmulas similares para las otras tecnologías de RP por adición de materiales analizadas en este capítulo, puesto que todas ellas usan el mismo método de fabricación capa por capa.

Después de haber formado todas las capas, el fotopolímero está curado en alrededor de 95%. Por lo tanto, la pieza se "cocina" en un horno fluorescente para solidificar por completo el polímero. El exceso de polímero se retira con alcohol, y a veces se usa arena ligera para mejorar la lisura y la apariencia.

De acuerdo con su diseño y orientación, una pieza puede contener elementos protuberantes sin medios de apoyo, durante la ejecución del método de abajo hacia arriba usado en la estereolitografía. Por ejemplo, en la pieza de la figura 34.1, si la mitad inferior del asa y la barra del asa inferior fueran eliminadas, la porción superior del asa no estaría apoyada durante la fabricación. En estos casos, pueden necesitarse pilares o mallas extras que se añaden a la pieza sólo con el fin de proporcionar apoyo. De otra forma las protuberancias pueden flotar o distorsionar la forma de la pieza deseada. Estos elementos extra deben eliminarse después de completar el proceso.

Curado en tierra sólida Al igual que la estereolitografía, el curado en tierra sólida (SGC, por sus siglas en inglés) funciona mediante el curado de un polímero fotosensible capa por capa para crear un modelo sólido basado en datos geométricos de CAD. En lugar de usar un láser explorador para realizar el curado de una capa dada, la capa completa se expone a una fuente de luz ultravioleta a través de una máscara que se coloca encima de la superficie del polímero líquido. El proceso de endurecimiento requiere de 2 a 3 segundos para cada capa. Cubital Ltd. vende los sistemas de SGC bajo el nombre ***Solider system.***

Los datos iniciales en el SGC son semejantes a los usados en la estereolitografía: un modelo geométrico en CAD de la pieza que se ha dividido en capas. Para cada capa, el procedimiento paso a paso en el SGC se ilustra en la figura 34.4 y se describe aquí: 1) Se crea una máscara en una placa de vidrio mediante la carga electrostática de una imagen negativa de la capa sobre la superficie. La tecnología para la creación de imágenes es básicamente la misma que la que se utiliza en las fotocopiadoras. 2) Se distribuye una capa plana delgada de fotopolímero líquido sobre la superficie de la plataforma de trabajo. 3) La máscara se coloca encima de la superficie del polímero líquido y se expone a una lámpara ultravioleta con alta energía (por ejemplo, 2 000 W). Las porciones de la capa de polímero líquido que no están protegidas por la máscara se solidifican en alrededor de 2 s. Las áreas sombreadas de la capa permanecen en estado líquido. 4) La máscara se retira, la placa de vidrio se limpia y se deja lista para una capa subsecuente en el paso 1. Asimismo, el polímero líquido restante sobre la superficie se retira en un procedimiento de frotado y succionado. 5) Las áreas abiertas de la capa se llenan con cera caliente. Cuando se endurece, la cera actúa para sostener las secciones salientes de la pieza. 6) Una vez que la cera se ha enfriado y solidificado, la superficie de polímero y cera se somete a fresado para formar una capa plana de espesor específico, lista para recibir la siguiente aplicación de fotopolímero líquido en el paso 2. Aunque se ha descrito el SGC como un proceso secuencial, ciertos pasos se realizan en paralelo. De manera específica, el paso 1 para la preparación de la máscara en la siguiente capa se ejecuta en forma simultánea con los pasos para la fabricación de la capa, del 2 al 6, usando dos placas de cristal durante capas alternadas.

La secuencia para cada capa requiere alrededor de 90 segundos. Se pretende que el tiempo de producción de una pieza mediante SGC sea alrededor de ocho veces más rápido que los sistemas RP equiparables [5]. La forma cúbica sólida creada en el SGC consiste en polímero sólido y cera. La cera proporciona soporte para los elementos frágiles y protuberantes de la pieza durante la fabricación, pero puede fundirse posteriormente para dejar la parte independiente. A diferencia de la estereolitografía, no se requiere curado posterior del modelo prototipo terminado.

Manufactura de deposición por goteo Estos sistemas operan al fundir el material inicial y disparar pequeñas gotas sobre una capa previamente formada. Las gotas líquidas se sueldan en frío a la superficie para formar una nueva capa. La deposición de gotas para cada nueva capa se controla por medio de una cabeza de trabajo con boquilla de aspersión que se mueve en el plano x-y, cuya trayectoria se basa en una sección transversal de un modelo geométrico en CAD que se ha dividido en capas (semejante a los otros sistemas de RP descritos

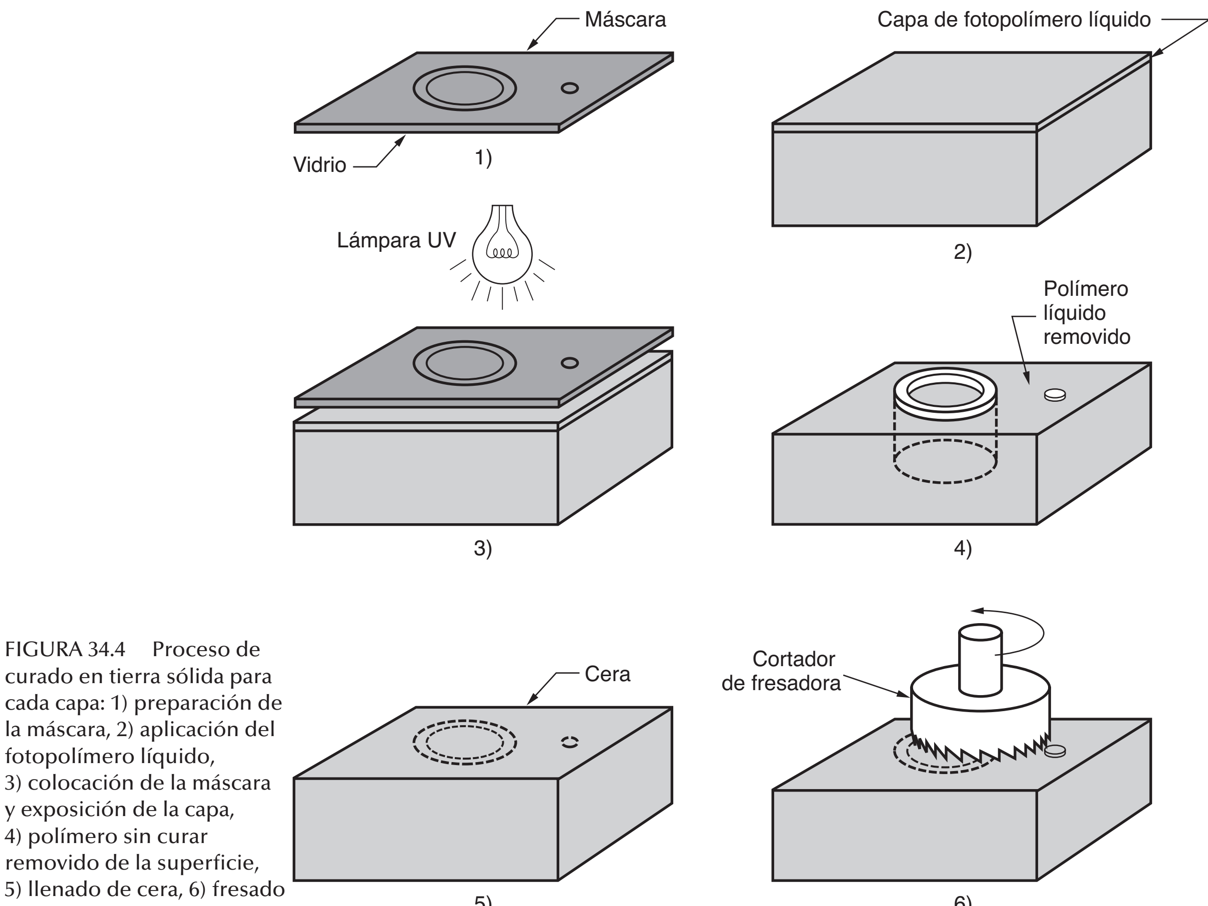


FIGURA 34.4 Proceso de curado en tierra sólida para cada capa: 1) preparación de la máscara, 2) aplicación del fotopolímero líquido, 3) colocación de la máscara y exposición de la capa, 4) polímero sin curar removido de la superficie, 5) llenado de cera, 6) fresado para lisura y espesor.

con anterioridad). Después de que cada capa se ha aplicado, la plataforma que soporta la pieza se baja a cierta distancia correspondiente al espesor de la capa, en preparación para la siguiente capa. El término manufactura de deposición por goteo (DDM, por sus siglas en inglés) se refiere al hecho de que se depositan pequeñas partículas de material de trabajo como pequeños proyectiles lanzados desde una boquilla en la cabeza de trabajo.

Varios sistemas de RP comerciales se basan en este principio operativo general, las diferencias están en el tipo de material que se deposita y la técnica correspondiente mediante la cual opera la cabeza de trabajo para fundir y aplicar el material. Un criterio importante que debe satisfacer el material inicial es que sea fácil de fundir y solidificar. Los materiales de trabajo usados en el DDM incluyen la cera y los termoplásticos, aunque también se han probado metales con punto de fusión bajo, como el estaño, el zinc, el plomo y el aluminio. Por ejemplo, la técnica de deposición por goteo puede usarse para aplicar gotas de soldadura suave para el empaque de circuitos integrados (sección 35.6) y tarjetas de circuitos impresos de línea fina (sección 36.2) [10].

Uno de los sistemas BPM más populares es el Personal Modeler®, vendido por BMP Technology, Inc. a un precio aproximado de $40 000 (al momento de escribir este texto), que es uno de los sistemas de RP de menor costo. Por lo general, se usa la cera como material de trabajo. La cabeza del eyector funciona con un oscilador piezoeléctrico que dispara pequeñas gotas de cera a una velocidad de 10 000 a 15 000 por segundo. Las gotas tienen un tamaño uniforme con un diámetro aproximado de 0.076 mm (0.003 in), las cuales se aplanan hasta un espesor solidificado de alrededor de 0.05 mm (0.002 in) en el momento de impactar contra la superficie de la pieza existente. Después de haber depositado cada capa, a la superficie se le aplica fresado o suavización térmica para lograr precisión en la dirección z. El espesor de la capa es de alrededor de 0.09 mm (0.0035 in).

34.2.2 Sistemas para la creación rápida de prototipos basados en sólidos

La característica común en estos sistemas RP es que el material inicial es sólido. En esta sección se analizan dos sistemas de RP basados en sólidos: 1) manufactura de objetos laminados y 2) modelado por deposición fundida.

Manufactura de objetos laminados La compañía principal que ofrece sistemas de manufactura de objetos laminados (LOM, por sus siglas en inglés) es Helisys, Inc. Resulta interesante saber que gran parte de los trabajos de investigación y desarrollo iniciales sobre la LOM fueron soportados por la National Science Foundation de Estados Unidos. La primera unidad comercial de LOM se lanzó en 1991.

La manufactura de objetos laminados produce un modelo físico sólido al superponer capas de material laminado, donde cada una es un corte del contorno correspondiente a la forma de la sección transversal de un modelo en CAD que se ha dividido en capas. Cada capa se pega encima de la previa, antes de realizar el corte. Después de cortar, el material en exceso de la capa permanece en su lugar para soportar la pieza durante la construcción. El material inicial en la LOM puede ser virtualmente cualquier material en forma laminar, como papel, plástico, celulosa, metales o materiales reforzados con fibra. El espesor de la materia prima está entre 0.05 y 0.50 mm (0.002 y 0.020 in). En la LOM, la hoja de material se suministra usualmente con adhesivo en la parte trasera y en forma de rollos que se envuelven en dos carretes, como en la figura 34.5. También es posible que el proceso de LOM incluya un paso de recubrimiento adhesivo para cada capa.

La fase de preparación de datos en la LOM consiste en rebanar el modelo geométrico mediante la utilización del archivo STL para la pieza dada. La función de rebanado se realiza con LOMSlice™, que es el software especial que se usa en la manufactura de objetos laminados. El rebanado del modelo STL en la LOM se realiza después de que cada capa se ha completado físicamente y de que se ha medido la altura vertical de la pieza. Esto proporciona una corrección de retroalimentación que debe tomarse en cuenta para el espesor real del material laminado que se está usando, ésta es una característica no disponible en la mayoría de los otros sistemas de RP. Con referencia a la figura 34.5, el proceso de LOM para cada capa puede describirse de la siguiente manera; se inicia la acción con la colocación de una hoja de material para después pegarla sobre las capas acomodadas previamente: 1) LOMSlice™ calcula el perímetro de la sección transversal del modelo STL con base en la altura medida de la parte física que incluye la capa que se ha colocado hasta el momento. 2) Se usa un rayo láser para cortar a lo largo del perímetro, así como para rayar las porciones exteriores de la hoja para remociones subsecuentes. De manera típica, el láser es de CO_2 y

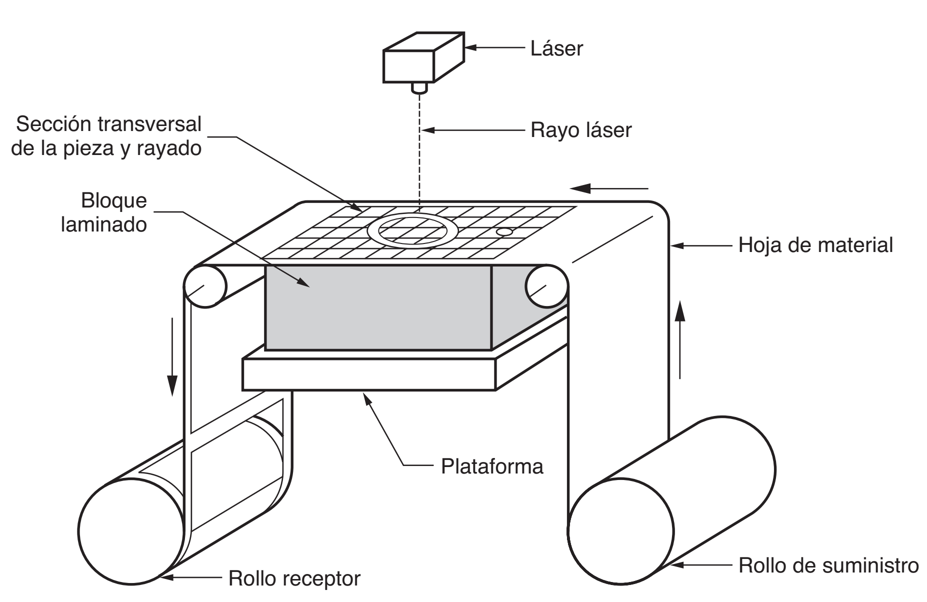


FIGURA 34.5 Manufactura de objetos laminados.

de 25 o 50 W. La trayectoria de corte se controla por medio de un sistema de posicionamiento *x-y*. La profundidad de corte se controla de manera que sólo se corta la capa superior. 3) La plataforma que sostiene la pila de capas se baja y la hoja de material avanza entre los carretes de suministro y recepción para la siguiente capa. Después la plataforma se eleva hasta una altura consistente con el espesor del material y un rodillo calentado se mueve a través de la capa nueva para pegar ésta. La altura de la pila de capas física se mide en preparación para que LOMSlice™ realice el siguiente cálculo de rebanado.

Cuando se han completado todas las capas, la pieza nueva se separa del exceso de material externo usando un martillo, un cincel y herramientas para el formado de madera. Después, la pieza puede lijarse para suavizar y redondear los bordes de la capa. Se recomienda una aplicación de sellado usando la aspersión de uretano, epóxicos u otro polímero para evitar la absorción de humedad. Los tamaños de las piezas producidas con LOM pueden ser relativamente grandes entre los procesos de RP, con volúmenes de trabajo de hasta 800 mm × 500 mm × 550 mm (32 in × 20 in × 22 in). Los volúmenes de trabajo más comunes son de 380 mm × 250 mm × 350 mm (15 in × 10 in × 14 in).

Existen varios sistemas de bajo costo que se basan en el método de construcción LOM. Por ejemplo, el JP System 5, creado por Schroff Development Corporation, usa una cuchilla mecánica en lugar de un láser para cortar el material laminado para cada capa. Este sistema se utiliza como una herramienta de enseñanza y requiere el ensamble manual de las capas.

Modelado por deposición fundida El modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés) es un proceso de RP en el que un filamento de cera o polímero se estira sobre la superficie de la pieza existente desde una cabeza de trabajo para completar cada capa nueva. La cabeza de trabajo se controla en el plano *x-y* durante cada capa y después se mueve hacia arriba una distancia igual a una capa en la dirección *z*. El material inicial es un filamento sólido con un diámetro típico de 1.25 mm (0.050 in) alimentado desde un carrete hacia la cabeza de trabajo que calienta el material a una temperatura cercana a 0.5 °C (1 °F) por encima de su punto de fusión antes de estirarlo sobre la superficie de la pieza. El material estirado se solidifica y se suelda en frío a la superficie de la pieza que está más fría en alrededor de 0.1 s. La pieza se fabrica a partir de la base superior, usando un procedimiento capa por capa semejante al de otros sistemas de RP.

El FDM fue creado por Stratasys Inc., que vendió su primera máquina en 1990. Los datos iniciales provienen de un modelo geométrico en CAD que se procesa mediante los módulos de software de Stratasys QuickSlice® y SupportWork™. QuickSlice® se usa para rebanar el modelo en capas y SupportWork™ se utiliza para generar cualesquiera estructuras de apoyo que se requieran durante el proceso de construcción. Si se requieren apoyos, se emplea un estirado dual y se usa un material diferente para crear los soportes. El segundo material se diseña para ser separado con facilidad del material de modelado primario. El espesor de la rebanada (capa) puede establecerse en cualquier punto entre 0.05 y 0.75 mm (0.002 y 0.030 in). Es posible depositar alrededor de 400 mm del material de filamento por segundo, mediante la cabeza de trabajo para estirado, en anchuras (llamadas el ***ancho del camino***) que pueden establecerse entre 0.25 y 2.5 mm (0.010 y 0.100 in). Los materiales iniciales incluyen la cera fundida por inversión y algunos polímeros, como ABS, poliamida, polietileno y polipropileno. Estos materiales no son tóxicos, lo que permite que la máquina de FDM pueda instalarse en un ambiente de oficina.

34.2.3 Sistemas para la creación rápida de prototipos basados en polvos

La característica común de las tecnologías de RP que se describen en esta sección es que el material inicial es polvo.[4] En esta categoría, se analizan dos sistemas de RP: 1) sinterización de láser selectiva y 2) impresión tridimensional.

Sinterización de láser selectiva La sinterización de láser selectiva (SLS) usa un rayo láser móvil para sinterizar polvos fusibles al calor en áreas correspondientes al modelo geomé-

[4]En los capítulos 16 y 17 se presentan la definición, las características y los métodos de producción de los polvos.

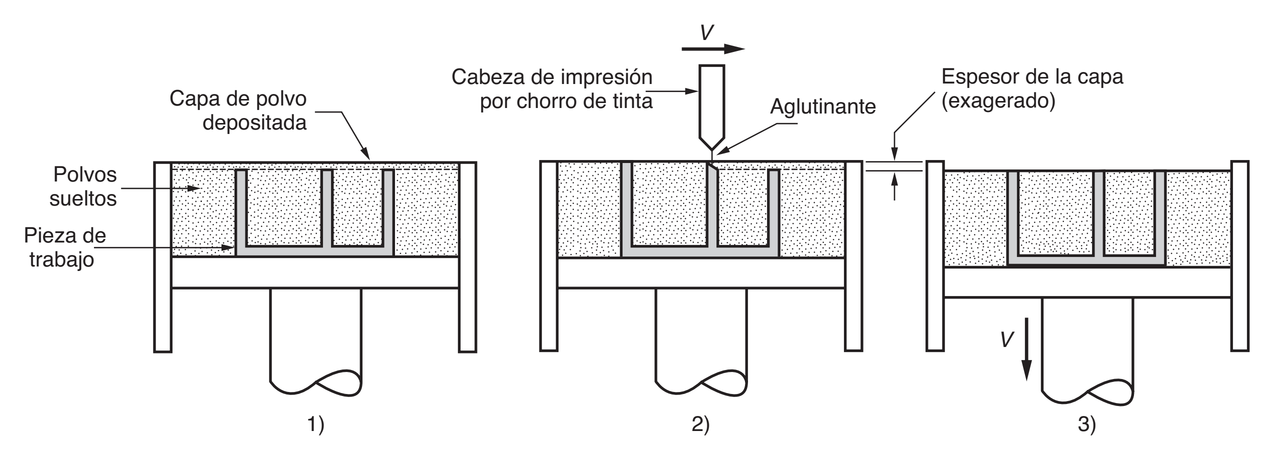
trico en CAD de una capa a la vez para construir la pieza sólida. Después de completar cada capa, se esparce una nueva capa de polvo suelto a través de la superficie usando un rodillo de contra-giro. Los polvos se calientan previamente hasta justo debajo de su punto de fusión con el propósito de facilitar el pegado y reducir la distorsión. Los polvos se pegan en forma gradual, capa por capa, en una masa sólida que forma la geometría tridimensional de la pieza. En áreas que no han sido sinterizadas por el rayo láser, los polvos permanecen sueltos de manera que puedan sacudirse de la pieza completa. Mientras tanto, sirven para soportar las regiones sólidas de la pieza mientras se realiza la fabricación. El espesor de capa está entre 0.075 y 0.50 mm (0.003 y 0.020 in).

La SLS fue desarrollada en la Universidad de Texas (Austin) como una alternativa a la estereolitografía, y en la actualidad DTM Corporation tiene en el mercado máquinas de SLS. Éste es un proceso más versátil que la estereolitografía en términos de los materiales de trabajo posibles. Los materiales actuales usados en la sinterización de láser selectiva incluyen el cloruro de polivinilo, el policarbonato, el poliéster, el poliuretano, el ABS, el nylon y la cera fundida por inversión. Estos materiales son menos costosos que las resinas fotosensibles usadas en la estereolitografía. Tampoco son tóxicas y pueden sinterizarse usando láseres de CO_2 con poca potencia (de 25 a 50 W). En ocasiones, también se utilizan polvos cerámicos y metálicos en la SLS.

Impresión tridimensional Esta tecnología de RP se creó en el Massachusetts Institute of Technology. En la impresión tridimensional (3DP) la pieza se construye de la manera capa por capa usual y se emplea una impresora de chorro de tinta para lanzar un material adhesivo sobre capas sucesivas de polvos. El aglutinante se deposita en áreas correspondientes a las secciones transversales de la pieza sólida, conforme lo determina el rebanado del modelo geométrico de CAD en capas. El aglutinante mantiene juntos a los polvos a fin de formar la pieza sólida, mientras que los polvos no aglutinados permanecen sueltos para ser removidos después. Mientras los polvos sueltos están sobre la pieza durante el proceso de construcción, proporcionan soporte para los elementos protuberantes y frágiles de la pieza. Cuando se completa el proceso de construcción, la pieza se trata térmicamente con el fin de endurecer el aglutinado, para después remover los polvos sueltos. Para endurecer aún más la pieza, puede aplicarse un paso de sinterización a fin de pegar los polvos individuales.

La pieza se construye sobre una plataforma cuyo nivel es controlado por medio de un pistón. A continuación se describirá el proceso para una sección transversal con referencia a la figura 34.6: 1) Se esparce una capa de polvo sobre la pieza existente en proceso. 2) Una cabeza de impresión por chorro de tinta se mueve a través de la superficie, lanzando gotas de aglutinante sobre aquellas regiones que deben convertirse en la parte sólida. 3) Cuando se completa la impresión de la capa actual, el pistón hace descender la plataforma para la siguiente capa.

FIGURA 34.6 Impresión tridimensional: 1) capa de polvo depositada, 2) impresión por chorro de tinta de las áreas que se convertirán en la pieza y 3) descenso del pistón para la siguiente capa (clave: v = movimiento).



Los materiales iniciales en la 3DP son polvos de cerámica, metal, o cermet y aglutinantes que son sílices poliméricos o coloidales o carburo de silicio [9], [11]. Los espesores típicos de capa están entre 0.10 y 0.18 mm (0.004 y 0.007 in). La cabeza de impresión por chorro de tinta se mueve a través de la capa a una velocidad de alrededor de 1.5 m/s (59 in/s), con la eyección de aglutinante líquido determinado durante el barrido mediante una exploración de trama. El tiempo de barrido, junto con la dispersión de polvos, permite un tiempo de ciclo por capa de alrededor de 2 segundos [11].

34.3 ASPECTOS DE APLICACIÓN EN LA CREACIÓN RÁPIDA DE PROTOTIPOS

Las aplicaciones de la creación rápida de prototipos pueden clasificarse en tres categorías: 1) diseño, 2) análisis y planeación de ingeniería y 3) herramientas y manufactura.

Diseño Ésta fue el área de aplicación inicial para los sistemas de RP. Los diseñadores pueden confirmar su diseño al construir un modelo físico real en un mínimo de tiempo usando la creación rápida de prototipos. Las características y funciones de la pieza pueden comunicarse a otros con mayor facilidad si se usa un modelo físico por medio de un dibujo en papel o al desplegarlo en el monitor de un sistema de CAD. Los beneficios al diseño atribuidos a la creación rápida de prototipos incluyen [2]: 1) reducción de tiempos de entrega para producir componentes del prototipo, 2) mejora de la capacidad para visualizar la configuración geométrica de la pieza debido a su existencia física, 3) detección temprana y reducción de errores de diseño y 4) aumento en la capacidad de calcular propiedades de masa de los componentes y ensambles.

Análisis y planeación de ingeniería La existencia de una pieza fabricada con RP permite la realización de ciertos tipos de actividades de análisis y planeación de ingeniería, las cuales podrían ser más difíciles de ejecutar sin la entidad física. Algunas de las posibilidades son: 1) comparación de diferentes formas y estilos para optimizar el atractivo estético de la pieza, 2) análisis del flujo de fluidos a través de diferentes diseños de orificios en válvulas fabricadas con RP, 3) pruebas en túnel de viento de diferentes formas aerodinámicas usando modelos físicos creados con RP, 4) análisis de esfuerzos de un modelo físico, 5) fabricación de piezas de preproducción mediante RP como un ayuda en la planeación del proceso y el diseño de herramientas y 6) combinación de tecnologías de despliegue de imágenes médicas, como MRI,[5] con RP para así crear modelos médicos en la planeación de procedimientos quirúrgicos o en la fabricación de prótesis o implantes.

Herramientas y manufactura La tendencia en las aplicaciones de RP es hacia un mayor uso en la fabricación de herramientas de producción y en la manufactura real de piezas. Cuando se adopta la RP para fabricar herramientas de producción, a menudo se utiliza el término ***fabricación rápida de herramientas*** (RTM, por sus siglas en inglés). Las aplicaciones de la RTM se dividen en dos enfoques [4]: el método RTM ***indirecto***, en el que se crea un patrón por medio de RP y el patrón se emplea para fabricar la herramienta, y el método RTM ***directo***, en el cual se usa la RP para fabricar la herramienta en sí. Los ejemplos de RTM indirecta incluyen: 1) el uso de una pieza fabricada con RP como el modelo para hacer un molde de caucho silicio que posteriormente se utiliza como un molde de producción, 2) patrones de RP para hacer los moldes de arena en procesos de fundición de arena (sección 11.1), 3) fabricación de patrones con materiales que tienen bajo punto de fusión (por ejemplo, cera) en cantidades limitadas para fundiciones por inversión (secciones 11.2.4) y 4) fabricación de electrodos para EDM (sección 26.3.1) [5], [9]. Entre los ejemplos de la RTM directa se encuentran: 1) insertos huecos para moldes fabricados con RP a los que se les puede aplicar aspersión de metal para producir moldes de inyección para una cantidad limitada de piezas plásticas de producción (sección 13.6) y 2) impresión tridimensional para crear una geometría de dado en polvos metálicos seguida por sinterización e infiltración para completar la fabricación del troquel [4], [5], [9].

[5]MRI son las siglas de imágenes de resonancia magnética (en inglés, *Magnetic Resonance Imaging*).

Los ejemplos de producción de piezas reales incluyen [9]: 1) piezas plásticas en lotes pequeños que no podrían moldearse por inyección de manera económica debido al alto costo del molde, 2) piezas con formas internas intrincadas que no podrían hacerse usando tecnologías convencionales sin ensamble y 3) piezas únicas como remplazos de huesos que deben fabricarse al tamaño correcto para cada usuario.

No todas las tecnologías de RP pueden usarse para todos estos ejemplos de herramientas y manufactura. Los lectores interesados pueden consultar tratamientos más completos de las tecnologías de RP para detalles específicos sobre éstos y otros ejemplos.

Problemas con la creación rápida de prototipos Los problemas principales con las tecnologías de RP actuales incluyen: 1) la precisión de la pieza, 2) la variedad limitada de material y 3) el desempeño mecánico de las piezas fabricadas.

La precisión de la pieza se ve limitada por varias fuentes de error en los sistemas de RP: 1) matemáticas, 2) relacionados con el proceso o 3) relacionados con el material [11]. Los errores matemáticos incluyen aproximaciones de las superficies de la pieza usadas en los datos de preparación para la RP y diferencias entre el espesor del rebanado y los espesores reales de las capas en la parte física. Las últimas diferencias ocasionan errores en la dimensión en el eje z. Una limitación inherente en la parte física consiste en los pasos entre las capas, especialmente conforme se incrementa el espesor de la capa, lo que causa una apariencia escalonada en la superficie de la pieza que tiene una pendiente. Los errores relacionados con el proceso son aquellos que se presentan debido a la tecnología particular usada para construir la pieza en el sistema de RP. Estos errores degradan la forma de cada capa así como el registro entre capas adyacentes. Los errores del proceso también pueden afectar la dimensión en el eje z. Finalmente, los errores relativos al material incluyen la contracción y la distorsión. Es posible proporcionar una holgura para la contracción al agrandar el modelo en CAD de la pieza, con base en la experiencia previa con el proceso y los materiales.

Los sistemas para la creación rápida de prototipos actuales están limitados en la variedad de materiales que pueden procesar. Por ejemplo, la tecnología de RP más común, la estereolitografía, se limita a los polímeros fotosensibles. En general, los materiales usados en sistemas de RP no son tan fuertes como los materiales para la producción de la pieza que se usarán en el producto real. Esto limita la eficiencia mecánica de los prototipos y la cantidad de pruebas realistas que pueden realizarse para verificar el diseño durante el desarrollo del producto.

REFERENCIAS

[1] Ashley, S., "Rapid Prototyping Is Coming of Age". ***Mechanical Engineering***, julio de 1995, pp. 62-68.

[2] Bakerjian, R. y Mitchell, P. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. VI. ***Design for Manufacturability.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1992, capítulo 7.

[3] Destefani, J., "Plus or Minus". ***Manufacturing Engineering***, abril de 2005, pp. 93-97.

[4] Hilton, P., "Making the Leap to Rapid Tool Making". ***Mechanical Engineering***, julio de 1995, pp. 75-76.

[5] Kai, C. C. y Fai, L. K., ***Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing,*** John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. Singapur, 1997.

[6] Kai, C. C. y Fai, L. K., "Rapid Prototyping and Manufacturing: The Essential Link between Design and Manufacturing", capítulo 6 en ***Integrated Product and Process Development: Methods, Tools, and Technologies,*** J. M. Usher, U. Roy y H. R. Parsaei (eds.), John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1998, pp. 151-183.

[7] Kochan, D., Kai, C. C. y Zhaohui, D., "Rapid Prototyping Issues in the 21st Century". ***Computers in Industry,*** vol. 39, pp. 3-10, 1999.

[8] Pacheco, J. M., ***Rapid Prototyping,*** Report MTIAC SOAR-93-01. Manufacturing Technology Information Analysis Center, IIT Research Institute, Chicago, Ill., 1993.

[9] Pham, D. T. y Gault, R. S., "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies". ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, vol. 38, pp. 1257-1287. 1998.

[10] Tseng. A. A., Lee, M. H. y Zhao, B., "Design and Operation of a Droplet Deposition System for Freeform Fabrication of

Metal Parts", ***ASME Journal of Eng. Mat. Tech.***, vol. 123, núm. 1, 2001.

[11] Yan, X. y Gu, P., "A Review of Rapid Prototyping Technologies and Systems", ***Computer-Aided Design***, vol. 28, núm. 4, pp. 307-318, 1996.

PREGUNTAS DE REPASO

34.1. ¿Qué es la creación rápida de prototipos? Proporcione una definición del término.

34.2. ¿Cuáles son los tres tipos de materiales iniciales en la creación rápida de prototipos?

34.3. Además del material inicial, ¿qué otra característica distingue las tecnologías para la creación rápida de prototipos?

34.4. ¿Cuál es el enfoque común utilizado en todas las tecnologías de adición de materiales para preparar las instrucciones de control para el sistema de RP?

34.5. De todas las tecnologías actuales para la creación rápida de prototipos, ¿cuál es la más utilizada?

34.6. Describa la tecnología de RP llamada curado en tierra sólida.

34.7. Describa la tecnología de RP llamada manufactura de objetos laminados.

34.8. ¿Cuál es el material inicial en el modelado por deposición fundida?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 11 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

34.1. El maquinado nunca se usa para la creación rápida de prototipos porque requiere mucho tiempo: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

34.2. ¿Cuál de los siguientes procesos para la creación rápida de prototipos inicia con un polímero líquido fotosensible para fabricar un componente? (dos respuestas correctas): *a*) fabricación de partículas balísticas, *b*) modelado por deposición fundida, *c*) sinterización de láser selectiva y *d*) estereolitografía.

34.3. De todas las tecnologías para la creación rápida de prototipos por adición de material, ¿cuál es la que se usa con mayor frecuencia?: *a*) fabricación de partículas balísticas, *b*) modelado por deposición fundida, *c*) sinterización de láser selectiva, *d*) curado en tierra sólida y *e*) estereolitografía.

34.4. ¿Cuál de las siguientes tecnologías de RP usa láminas sólidas como material inicial?: *a*) fabricación de partículas balísticas, *b*) modelado por deposición fundida, *c*) manufactura de objetos laminados, *d*) curado en tierra sólida y *e*) estereolitografía.

34.5. ¿Cuál de las siguientes tecnologías de RP usa polvos como material inicial? (dos respuestas correctas): *a*) fabricación de partículas balísticas, *b*) modelado por deposición fundida, *c*) sinterización de láser selectiva, *d*) curado en tierra sólida y *e*) impresión tridimensional.

34.6. Las tecnologías para la creación rápida de prototipos nunca se usan para hacer piezas de producción: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

34.7. ¿Cuáles de los siguientes problemas se presentan en las tecnologías para la creación rápida de prototipos por adición de material? (tres mejores respuestas): *a*) incapacidad del diseñador para diseñar la pieza, *b*) incapacidad de dividir una pieza sólida en capas, *c*) variedad limitada de materiales, *d*) precisión de la pieza, *e*) contracción de la pieza y *f*) poca maquinabilidad del material inicial.

PROBLEMAS

34.1. Se va a fabricar, usando estereolitografía, el prototipo de un tubo, el cual tiene una sección transversal cuadrada. La dimensión externa del cuadrado es de 100 mm y la dimensión interna es de 90 mm (espesor de pared de 5 mm, excepto en las esquinas). La altura del tubo (dirección *z*) es de 80 mm. El espesor de la capa es de 0.10 mm. El diámetro del rayo láser ("tamaño de punto") es de 0.25 mm y el rayo se mueve a través de la superficie del fotopolímero a una velocidad de 500 mm/s. Haga una estimación del tiempo requerido para construir la pieza, si se pierden 10 s en cada capa para bajar la plataforma que sostiene la pieza. No tome en cuenta el tiempo de curado posterior.

34.2. Resuelva el problema 34.1, pero ahora considere que el espesor de la capa es de 0.40 mm.

34.3. La pieza del problema 34.1 se va a fabricar usando modelado por deposición fundida en lugar de estereolitografía. El espesor de la capa debe ser de 0.20 mm, y el ancho del estirado que se deposita sobre la superficie de la pieza es de 1.25 mm. La cabeza de trabajo del extrusor se mueve en el plano *x-y* a una velocidad de 150 mm/s. Se experimenta un retraso de 10 s entre cada capa para recolocar la cabeza de trabajo. Haga una estimación del tiempo requerido para construir la pieza.

34.4. Resuelva el problema 34.3, usando la siguiente información adicional: Se sabe que el diámetro del filamento alimentado en la cabeza de trabajo del extrusor es de 1.25 mm, y el filamento se suministra en la cabeza de trabajo desde su carrete a una velocidad de 30.6 mm de longitud por segundo mientras que la cabeza de trabajo deposita material. Entre las capas, la velocidad de alimentación desde el carrete es cero.

34.5. Una pieza cónica debe fabricarse usando estereolitografía. El radio del cono en su base es de 35 mm y su altura de 40 mm. El espesor de la capa es de 0.20 mm. El diámetro del rayo láser es de 0.22 mm y el rayo se mueve a través de la superficie del fotopolímero a una velocidad de 500 mm/s. Haga una estimación del tiempo requerido para construir la pieza, si se pierden 10 s en cada capa para bajar la plataforma que sostiene la pieza. No tome en cuenta el tiempo de curado posterior.

34.6. Se va a construir la pieza con forma cónica del problema 34.5, usando manufactura de objetos laminados. El espesor de la capa es de 0.20 mm. El rayo láser puede cortar el material laminado a una velocidad de 500 mm/s. Haga una estimación del tiempo requerido para construir la pieza, si se pierden 10 s en cada capa para hacer descender la plataforma que sostiene la pieza y hacer avanzar el material laminado en preparación para la siguiente capa. No tome en cuenta el corte de las áreas rayadas fuera de la pieza, puesto que el cono debe obtenerse rápidamente dada su geometría.

34.7. Se va a usar estereolitografía para construir la pieza de la figura 34.1 en el texto. Las dimensiones de la pieza son: altura de 125 mm, diámetro exterior de 75 mm, diámetro interior de 65 mm, diámetro del asa de 12 mm, distancia del asa a la taza de 70 mm medida desde el centro (eje) de la taza al centro del asa. La barra del asa que la conecta con la taza en las partes superior e inferior de la pieza tiene una sección transversal rectangular con 10 mm de espesor y 12 mm de ancho. El espesor en la base de la taza es de 10 mm. El diámetro del rayo láser es de 0.25 mm y el rayo puede moverse a través de la superficie del fotopolímero en 500 mm/s. El espesor de la capa es de 0.20 mm. Haga una estimación del tiempo requerido para construir la pieza; considere que se pierden 10 s en cada capa para hacer descender la plataforma que sostiene la pieza. No tome en cuenta el tiempo de curado posterior.

35 PROCESAMIENTO DE CIRCUITOS INTEGRADOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Un ***circuito integrado*** (CI) es una serie de dispositivos electrónicos, como transistores, diodos y resistores, que se han fabricado e interconectado de manera eléctrica en una pequeña pastilla (chip) plana de material semiconductor. El CI se inventó en 1959 y ha sido objeto de desarrollo continuo desde entonces (nota histórica 35.1). El silicio (Si) es el material semiconductor que más se utiliza para los CI, debido a su combinación de propiedades y bajo costo. Es menos común el uso de pastillas semiconductoras con germanio (Ge) y arseniuro de galio (GaAs). Como los circuitos se fabrican de una pieza única de material sólido, se utiliza el término electrónico de ***estado sólido*** para hacer referencia a estos dispositivos.

El aspecto más fascinante de la tecnología microelectrónica es el gran número de dispositivos que pueden encapsularse en una sola pastilla pequeña. Se han creado varios

Nota histórica 35.1 *Materiales para herramientas de corte.*

La historia de los circuitos integrados incluye las invenciones de dispositivos electrónicos y los procesos para hacer estos dispositivos. La invención del radar inmediatamente antes de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) identificó al germanio y al silicio como elementos semiconductores importantes para los diodos que se utilizaban en el sistema de circuitos del radar. Debido a la importancia de la tecnología del radar en la guerra se crearon las fuentes comerciales del germanio y del silicio.

En 1947, J. Bardeen y W. Brattain inventaron el transistor en Bell Telephone Laboratories. Posteriormente, W. Shockley, de Bell Labs, inventó una versión mejorada en 1952. Estos tres inventores recibieron el Premio Nobel de física en 1956 por su investigación sobre los semiconductores y el descubrimiento del transistor. El interés de Bell Labs era crear sistemas de conmutación electrónicos que fueran más confiables que los relevadores electromecánicos y las válvulas al vacío que se utilizaban en esa época.

En febrero de 1959, J. Kilby, de Texas Instruments Inc., patentó la fabricación de dispositivos electrónicos múltiples y su interconexión para formar un circuito en una sola pieza de material semiconductor. Kilby estaba describiendo un circuito integrado (CI). En mayo de 1959, J. Hoerni de Fairchild Semiconductor Corporation patentó el proceso planar para la fabricación de transistores. En julio del mismo año, R. Noyce también de Fairchild patentó un dispositivo similar al de Kilby pero especificando el uso de la tecnología planar y de las terminales adherentes.

Aunque se formuló después que la de Kilby, la patente de Noyce se emitió primero, en 1961 (la patente de Kilby se otorgó en 1964). Esta discrepancia en las fechas y similitud en la invención produjo una controversia considerable acerca de quién fue realmente el inventor del CI. El tema llegó a instancias legales y hasta a la Suprema Corte de Estados Unidos. La corte máxima se negó a escuchar el caso dejándolo a una corte inferior que favoreció las reclamaciones de Noyce. El resultado (bajo el riesgo de ser muy simplistas) es que Kilby generalmente se lleva el crédito por el concepto del circuito integrado monolítico, mientras que a Noyce se le acredita el método para fabricarlo.

Los primeros CI comerciales fueron presentados en marzo de 1960 por Texas Instruments. Los primeros circuitos integrados contenían cerca de diez dispositivos en una pequeña pastilla de silicio, de aproximadamente 3 mm^2 (0.12 in^2). Para 1966, el silicio ya había rebasado al germanio como el material semiconductor preferido. Desde aquel año, el silicio ha sido el material predominante en la fabricación de circuitos integrados. A partir de la década de 1960 ha existido en la industria electrónica una tendencia continua hacia la miniaturización y a la integración de dispositivos múltiples en una sola pastilla (el progreso puede verse en la tabla 35.1), la cual enlista los componentes que se describirán en este capítulo.

términos para definir el nivel de integración y la densidad del encapsulado, como la integración a gran escala y la integración a escala muy grande (por sus siglas en inglés, LSI y VLSI, respectivamente). En la tabla 35.1 se enlistan estos términos, sus definiciones (aunque no hay un acuerdo total en las fronteras entre los niveles) y el periodo durante el cual la tecnología se estaba o se está introduciendo.

35.1 PANORAMA DEL PROCESAMIENTO DE CI

Estructuralmente, un circuito integrado consiste en cientos, miles o millones de dispositivos electrónicos microscópicos que se han fabricado e interconectado eléctricamente den-

TABLA 35.1 Niveles de integración en la microelectrónica.

Nivel de integración	Número de dispositivos en una pastilla	Fecha aprox. de introducción
Integración a pequeña escala (SSI)	10-50	1959
Integración a mediana escala (MSI)	$50\text{-}10^{a}$	1960
Integración a gran escala (LSI)	$10^3\text{-}10^4$	1970
Integración a escala muy grande (VLSI)	$10^4\text{-}10^6$	1980
Integración a escala ultragrande (ULSI)	$10^6\text{-}10^8$	1990
Integración a escala giga	$10^9\text{-}10^{10}$	2000

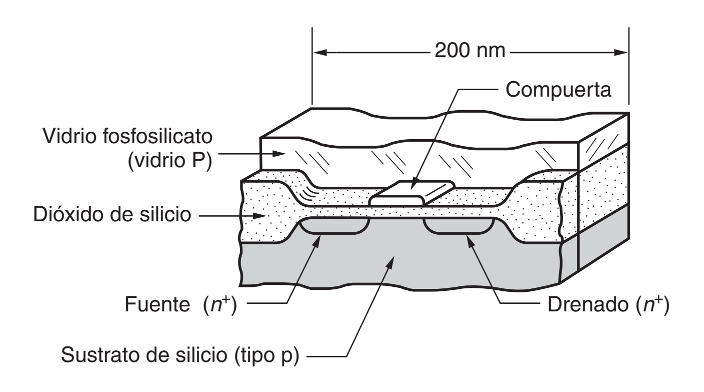


FIGURA 35.1 Sección transversal de un transistor (específicamente un MOSFET) en un circuito integrado. Se muestra el tamaño aproximado del dispositivo, los tamaños de las características dentro del dispositivo pueden ser tan pequeños como 40 nm.

tro de la superficie de una pastilla de silicio. Un ***chip***, también llamado ***dado,*** es una placa plana rectangular o cuadrada que tiene un espesor aproximado de 0.5 mm (0.020 in) y, por lo general, entre 5 y 25 mm (0.200 y 1.0 in) por lado. Cada dispositivo electrónico (es decir, transistor, diodo, etcétera) que se encuentra en la superficie del chip consiste en capas y regiones separadas con propiedades eléctricas diferentes, que se combinan para realizar la función particular del dispositivo. En la figura 35.1 se ilustra una sección transversal típica de un MOSFET.[1] Los dispositivos se conectan eléctricamente uno con otro mediante líneas muy finas de material conductor, usualmente aluminio, de manera que los dispositivos interconectados (esto es, el circuito integrado) funcionen en la forma especificada. También se proporcionan líneas de conducción y almohadillas para conectar eléctricamente el CI a las terminales, las cuales a su vez permiten que el CI se conecte a circuitos externos.

Con el fin de permitir que el CI se conecte al mundo exterior y se proteja de cualquier daño, el chip se conecta a una estructura de terminales y se encapsula en forma adecuada, como en la figura 35.2. Por lo general, el encapsulado se hace de cerámica o plástico, los cuales proporcionan protección mecánica y ambiental para el chip e incluye terminales mediante las cuales el CI se conecta eléctricamente a circuitos externos. Las terminales se encuentran conectadas a las almohadillas conductoras del chip, las cuales tienen acceso al CI.

35.1.1 Secuencia del procesamiento

La secuencia para fabricar las pastillas de CI basadas en silicio comienza con el procesamiento del mismo (sección 7.5.2). En breve, el silicio con una pureza muy alta se reduce en varios pasos a partir de arena (dióxido de silicio, SiO_2). El silicio se acumula a partir de un material fundido hasta obtener un solo cristal sólido y grande, con una longitud típica de entre 1 y 3 m (3 y 10 ft) y un diámetro de hasta 300 mm (12 in). Este monocristal, llamado ***boule***, se rebana en obleas delgadas, las cuales son discos de un espesor igual a 0.5 mm (0.020 in) aproximadamente.

Después de una limpieza y un acabado adecuados, las obleas están listas para la secuencia de procesos mediante las cuales se crearán en su superficie varias características microscópicas de diversas químicas para formar los dispositivos electrónicos y sus intraconexiones. La secuencia consiste en varios tipos de procesos; la mayoría de ellos se repite muchas veces. Para producir un CI moderno, puede requerirse un total de 200 pasos. Básicamente, el objetivo de cada paso es agregar, alterar o remover una capa de material en las regiones seleccionadas de la superficie de la oblea. A los pasos para formar estas capas en la fabricación de un CI algunas veces se les denomina ***proceso planar,*** debido a que el procesamiento confía en que la forma geométrica de la oblea de silicio sea un plano.

[1]MOSFET significa transistor con efecto en campo de óxido metálico semiconductor (por el inglés Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor). Un transistor es un dispositivo semiconductor capaz de realizar diferentes funciones, como la amplificación, el control o la generación de señales eléctricas. Un transistor con efecto en campo es aquél en el que la corriente fluye entre las regiones de fuente y de drenado a través de un canal; el flujo depende de la aplicación del voltaje a la compuerta del canal. Un FET de óxido metálico semiconductor usa dióxido de silicio para separar el canal y la metalización de la compuerta.

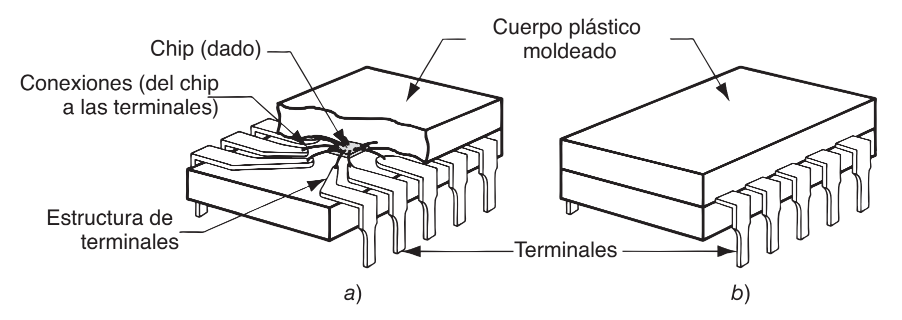


FIGURA 35.2 Encapsulado de un chip de circuito integrado: *a*) vista de corte que muestra el chip pegado a una estructura de terminales y encapsulado en una envoltura plástica y *b*) forma en que el encapsulado aparece frente al usuario. Este tipo se denomina encapsulado dual en línea (DIP).

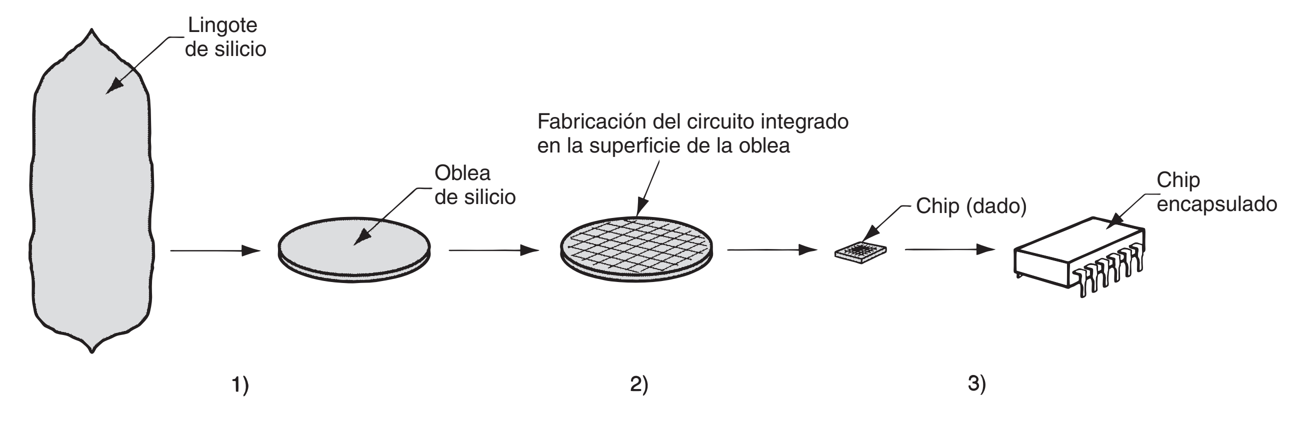
Los procesos mediante los cuales se agregan las capas incluyen técnicas de deposición de películas finas tales como la deposición física de vapor (sección 29.3) y la deposición química de vapor (sección 29.4), y las capas existentes se alteran mediante la difusión e implantación iónica (sección 28.3). También se emplean técnicas adicionales para la formación de capas, como la oxidación térmica. Las capas se remueven de las regiones seleccionadas a través de técnicas de ataque químico, utilizando agentes químicos (por lo general, soluciones ácidas) y otras tecnologías más avanzadas, como el ataque químico con plasma.

La adición, alteración y remoción de capas deben hacerse de manera selectiva; esto es, sólo en algunas regiones extremadamente pequeñas de la superficie de la oblea para crear los detalles de los dispositivos, como en la figura 35.1. Para distinguir qué regiones se afectarán con cada paso del procesamiento, se utiliza un procedimiento que implica la aplicación de ***litografía***. En esta técnica, se forman mascarillas en la superficie para proteger algunas áreas y permitir que otras queden expuestas al proceso particular (por ejemplo, la deposición de películas o el ataque químico). La repetición consecutiva de estos pasos promueve la exposición de diferentes áreas en cada paso; la oblea inicial de silicio se transforma de manera gradual en muchos circuitos integrados.

El procesamiento de la oblea se organiza de modo que se formen muchas superficies individuales de los chips en una sola oblea. Como la oblea es redonda con diámetros que van de 150 a 300 mm (6 a 12 in), mientras que el chip final es de sólo 12 mm^2 (0.20 in^2), es posible producir cientos de chips de una sola oblea. Al terminar el procesamiento planar, todos los CI en la oblea se prueban visual y funcionalmente; la oblea se divide en chips individuales y los que pasan las pruebas de calidad se encapsulan como en la figura 35.2.

En resumen, puede decirse que la producción de los circuitos integrados basados en silicio consiste en las siguientes etapas, como se presenta en la figura 35.3: 1) ***Procesamiento de silicio***, en el cual la arena se reduce a silicio muy puro y después se forma como obleas; 2) ***fabricación de CI***, que consiste en múltiples pasos de procesamiento que agregan, alteran y remueven capas delgadas en regiones seleccionadas para formar los dispositivos

FIGURA 35.3 Secuencia de los pasos de procesamiento en la producción de circuitos integrados: 1) el silicio puro se forma a partir del estado fundido, se convierte en lingote y después se corta en obleas 2) fabricación de los circuitos integrados en la superficie de las obleas y 3) la oblea se corta en chips y se encapsula.



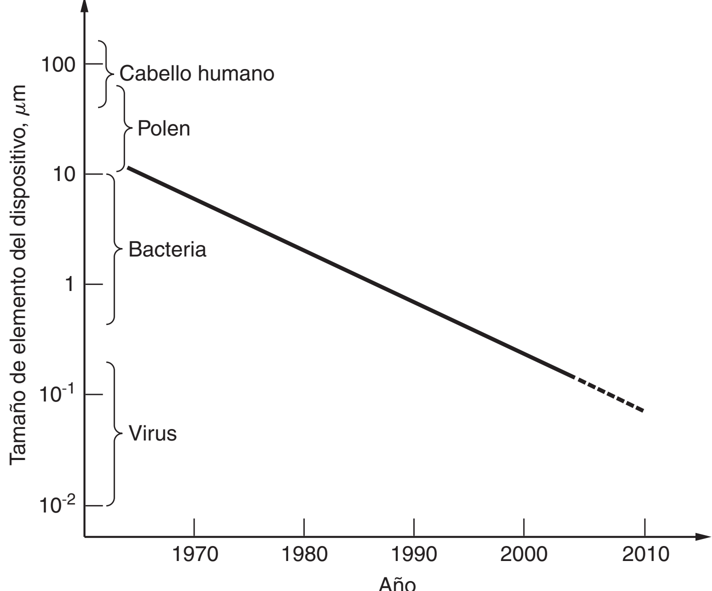


FIGURA 35.4 Tendencia en el tamaño de los elementos de los dispositivos en la fabricación de CI; también se muestra el tamaño de partículas aéreas comunes que pueden contaminar el entorno del procesamiento. Se espera que los tamaños mínimos de los elementos para los CI del tipo lógico sean de alrededor de 13 nm en el año 2016 [9].

electrónicos; se utiliza la litografía para definir las regiones que van a procesarse sobre la superficie de la oblea; y 3) ***encapsulado del CI,*** en el cual la oblea se prueba y se corta en dados individuales (pastillas o chip de CI), y los dados se encapsulan en forma adecuada.

La presentación en las secciones subsecuentes de este capítulo se relaciona con los detalles de estas etapas de procesamiento. En la sección 35.2 se trata el procesamiento del silicio. En la sección 35.3 se analiza la litografía y en la 35.4, los procesos utilizados junto con la litografía para agregar, alterar o remover capas. Se considera un ejemplo para la fabricación de un CI en la sección 35.5. La sección 35.6 describe el corte de los dados y el encapsulado de los chips. Y, por último, en la sección 35.7 se cubre el análisis de la fabricación de circuitos integrados.

Antes de comenzar la cobertura de los detalles del procesamiento, es importante observar que las dimensiones microscópicas de los dispositivos en los circuitos integrados imponen requerimientos especiales en el ambiente dentro del cual se lleva a cabo la fabricación de CI.

35.1.2 Salas limpias

Gran parte de la secuencia de procesamiento de los circuitos integrados debe realizarse en una sala limpia, un ambiente que es más parecido a un quirófano que a una fábrica de producción. Los tamaños microscópicos característicos de un CI dictan la limpieza y esta escala continúa disminuyendo cada año que pasa. En la figura 35.4 se muestra la tendencia en los tamaños característicos de un dispositivo de CI; también se muestran en la misma figura las partículas comunes del aire que son contaminantes potenciales en el procesamiento de CI. Estas partículas pueden causar defectos en los circuitos integrados, lo que reduce el rendimiento e incrementa los costos.

Una sala limpia proporciona protección contra estos contaminantes. El aire se purifica para remover la mayoría de las partículas del ambiente de procesamiento; también se controlan la temperatura y la humedad. Se utiliza un sistema de clasificación estándar para especificar la limpieza de un sala limpia. En el sistema, se usa un número (en incrementos de 10) para indicar la cantidad de partículas de un tamaño de 0.5 μm o mayores por pie cúbico de aire.[2] De este modo, un sala limpia ***clase 100*** debe mantener una cuenta de partícu-

[2]Sólo en Estados Unidos se mezclan unidades métricas (0.5 μm) con unidades de uso común en ese país (ft^3).

las, cuyo tamaño sea de 0.5 μm o mayor, en menos de 100/ft^3. El procesamiento de las VLSI modernas requiere de una sala limpia ***clase 10***, lo que significa que el número de partículas del tamaño igual o mayor a 0.5 μm esté por debajo de 10/ft^3. El aire acondicionado en la sala limpia tiene una temperatura de 21 °C (70 °F) y una humedad relativa de 45%. El aire pasa a través de un filtro de alta eficiencia para partículas de aire (HEPA, por las siglas en inglés) con el propósito de capturar las partículas contaminantes.

Los humanos somos la mayor fuente de contaminación en el procesamiento de CI; entre los contaminantes que provienen de nosotros están las bacterias, el humo del tabaco, los virus, el cabello y otras partículas. Los trabajadores humanos en las áreas de procesamiento de circuitos integrados necesitan utilizar ropas especiales, por lo general prendas blancas, guantes y redes para el cabello. Donde se requiere limpieza extrema, los trabajadores se aíslan completamente en un traje de una sola pieza. El equipo de procesamiento es una segunda fuente de contaminantes; la maquinaria produce partículas por su desgaste, por el aceite, la suciedad y contaminantes similares. Por lo general, el procesamiento de los CI se realiza en áreas de trabajo cubiertas por un flujo laminar, el cual puede purificarse a niveles mayores de limpieza que el ambiente general de una sala limpia.

Además de la atmósfera tan pura que proporciona una sala limpia, los reactivos químicos y el agua que se utilizan en el procesamiento de CI deben ser muy limpios y libres de partículas. La práctica moderna requiere que los productos químicos y el agua se filtren antes de utilizarse.

35.2 PROCESAMIENTO DEL SILICIO

Las pastillas microelectrónicas se fabrican con un sustrato de un material semiconductor. El silicio es el semiconductor líder en la actualidad y constituye más de 95% de todos los dispositivos semiconductores que se producen en el mundo. El análisis acerca de este tratamiento inicial se limitará al silicio (Si). La preparación del sustrato del silicio puede dividirse en tres pasos: 1) producción de silicio de grado electrónico, 2) acumulación cristalina y 3) formado del silicio en obleas.

35.2.1 Producción de silicio de grado electrónico

El silicio es uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre (véase tabla 7.1); aparece de manera natural como sílice (por ejemplo, arena) y silicatos (como arcilla). El silicio de grado electrónico (EGS, por sus siglas en inglés) es un silicio policristalino de pureza muy alta, tan puro que las impurezas se encuentran dentro del rango de partes por miles de millones (ppb). Éstos no pueden medirse mediante técnicas convencionales de laboratorio químico, sino que deben calcularse a partir de medidas de resistividad en los lingotes de prueba. La reducción del compuesto de silicio que aparece naturalmente hasta la obtención del EGS implica los siguientes pasos de procesamiento.

El primer paso se realiza en un horno de arco de electrodo sumergido. La materia prima principal para el silicio es la ***cuarcita***, la cual es SiO_2 en forma muy pura. La carga también incluye carbón, coque y astillas de madera como fuentes de carbono para las diversas reacciones químicas que ocurren en el horno. El producto neto consiste en un silicio de grado metalúrgico (MGS, por sus siglas en inglés) y en los gases SiO y CO. El MGS sólo contiene alrededor de 98% de Si, que resulta adecuada para las aleaciones metalúrgicas, pero no para los componentes electrónicos. Las impurezas principales (que conforman el restante 2% del MGS) incluyen el aluminio, el calcio, el carbono, el hierro y el titanio.

El segundo paso implica el molido del frágil MGS y la reacción de los polvos de Si con el anhidro HCl para formar triclorosilano:

$$Si + 3HCl(gas) \rightarrow SiHCl_3(gas) + H_2(gas) \qquad (35.1)$$

La reacción se lleva a cabo en un reactor de lecho fluidizado a temperaturas alrededor de los 300 °C (550 °F). El triclorosilano ($SiHCl_3$) es líquido a temperatura ambiente, aunque se muestra como un gas en la ecuación (35.1). Su bajo punto de ebullición de 32 °C (90 °F) permite que se separe de las impurezas restantes del MGS mediante destilación fraccional.

El paso final en el proceso es la reducción del triclorosilano purificado por medio de hidrógeno gaseoso. El proceso se lleva a cabo a temperaturas de hasta 1 000 °C (1 800 °F), y puede escribirse una ecuación simplificada de la reacción de la manera siguiente:

$$SiHCl_3(gas) + H_2(gas) \rightarrow Si + 3HC1(gas) \qquad (35.2)$$

El producto de esta reacción es un silicio de grado electrónico, es decir, silicio casi 100% puro. En la presente sección se mencionarán dos procesos para llevar a cabo ésta. El primero es el ***proceso Siemens***, en el cual se deposita silicio en una varilla delgada de silicio mediante la deposición química de vapor. Es capaz de producir cilindros de silicio policristalino de hasta 200 mm (8 in) de diámetro y 3 m (10 ft) de largo. El proceso Siemens ha predominado en la industria desde aproximadamente 1970, pero tiene varias desventajas [6]: 1) un alto costo del equipo, 2) un alto consumo de energía, 3) una eficiencia relativamente baja en la producción de silicio debido a los productos de reacciones intermedias como el $SiCl_4$ y 4) el costo de mano de obra es alto, porque se trata de un proceso por lotes. El proceso alternativo emplea un reactor de lecho fluidizado en lugar de la CVD, pero durante el proceso ocurren reacciones similares. Se espera que aumente el uso del proceso de reactor, debido a las siguientes ventajas que presenta sobre el método Siemens [6]: 1) mayor nivel del silicio en el producto, 2) menor consumo de energía y 3) operación continua en vez de operación por lotes.

35.2.2 Acumulación cristalina

El sustrato de silicio para los chips microelectrónicos debe hacerse de un solo cristal cuya celda unitaria esté orientada en cierta dirección. Las propiedades del sustrato y el modo en que se procesa están influidas por estos factores. Por tal razón, el silicio que se utiliza como materia prima en la fabricación de dispositivos semiconductores no sólo debe tener una pureza muy alta, como en el silicio de grado electrónico, sino que también debe prepararse en la forma de un solo cristal y después cortarse en una dirección que logre obtener la orientación planar deseada. El proceso de acumulación cristalina se cubre en esta sección, mientras que en la siguiente se detalla la operación de corte.

El método de acumulación cristalina que se utiliza con mayor amplitud en los semiconductores es el ***proceso Czochralski*,** ilustrado en la figura 35.5, en el cual un lingote de un solo cristal, llamado ***boule***, se extrae hacia arriba desde un pozo de silicio fundido. La instalación incluye un horno, un aparato mecánico para levantar el boule, un sistema de vacío y controles de soporte. El horno consiste en un crisol y un sistema de calentamiento que se encuentran en una cámara de vacío. El crisol se sostiene mediante un mecanismo que permite la rotación durante el procedimiento de extracción del cristal. Los trozos de EGS se colocan en el crisol y se calientan a una temperatura ligeramente superior al punto de fusión del silicio: 1 410 °C (2 570 °F). El calentamiento es por inducción o resistencia; el segundo método se utiliza para tamaños grandes de fusión. Al silicio fundido se le aplica un doping[3] antes de la extracción del boule, para convertir el cristal en tipo p o tipo n.

Para iniciar la acumulación cristalina, se introduce en el pozo una semilla cristalina de silicio y después se retira hacia arriba en condiciones cuidadosamente controladas. Al principio, la velocidad de extracción (la velocidad vertical del aparato de extracción) es relativamente alta, lo que origina que un solo cristal de silicio se solidifique contra la semilla,

[3]El término ***doping*** o ***dopado*** se refiere a la introducción de impurezas en el material semiconductor para alterar sus propiedades eléctricas, convirtiendo al semiconductor en un tipo n (exceso de electrones en su estructura) o un tipo p (falta de electrones en su estructura).

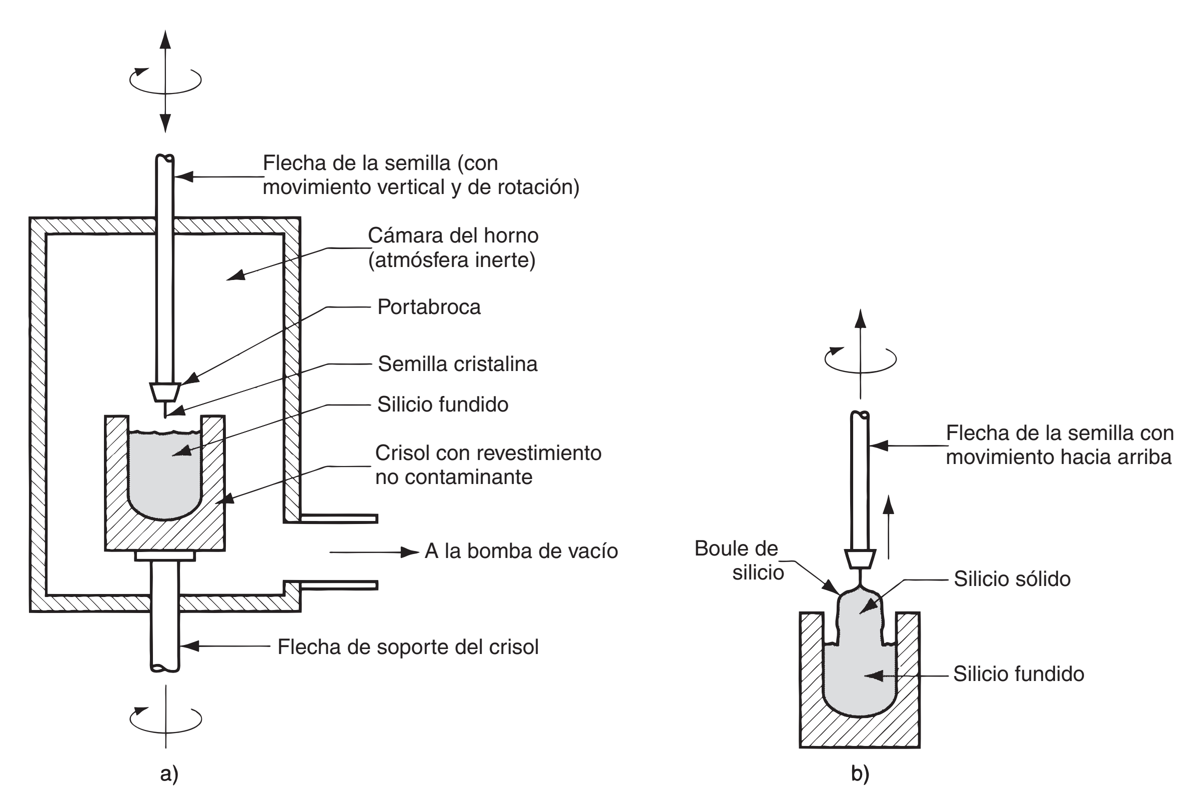


FIGURA 35.5 El proceso Czochralski para crecimiento de lingotes de un solo cristal de silicio: *a*) preparación inicial previa al comienzo de la extracción del cristal y *b*) durante la extracción del cristal para formar el boule.

formando un cuello delgado. Después, se reduce la velocidad, lo que ocasiona que el cuello crezca hasta el diámetro deseado del boule mientras se mantiene su estructura de un solo cristal. Además de la velocidad de extracción, se usan la rotación del crisol y otros parámetros del proceso para controlar el tamaño del boule. Por lo regular, se producen lingotes de un solo cristal, cuyo diámetro es de 300 mm (12 in) o más, y hasta 3 m (10 ft) de largo, para la fabricación subsecuente de los chips microelectrónicos.

Es importante prevenir la contaminación del silicio durante el crecimiento de cristales, puesto que los contaminantes, aun en pequeñas cantidades, pueden alterar drásticamente las propiedades eléctricas del silicio. Para minimizar las reacciones no deseadas con el silicio y la inserción de contaminantes a las elevadas temperaturas de la acumulación cristalina, el procedimiento se lleva a cabo ya sea en presencia de un gas inerte (argón o helio) o al vacío. La elección del material del crisol también es importante; el sílice fundido (SiO_2), aunque no es perfecto para la aplicación, representa el mejor material disponible y se utiliza casi exclusivamente. La disolución gradual del crisol introduce oxígeno como una impureza no intencional en el boule de silicio. Desafortunadamente, el nivel de oxígeno en la fundición aumenta durante el proceso, lo cual conduce a una variación en la concentración de la impureza a través de todo el largo y el diámetro del lingote.

35.2.3 Formación de silicio en obleas

Se utiliza una serie de pasos de procesamiento para reducir el boule a obleas delgadas en forma de discos. Los pasos pueden agruparse en la siguiente forma: 1) preparación del lingote, 2) rebanado de las obleas, 3) preparación de la oblea. En la preparación del lingote, primero se cortan los extremos en semilla del lingote, así como las porciones que no cumplen con los estrictos requerimientos de resistividad y cristalográficos para el procesamiento subsecuente del CI. Enseguida, se usa una forma de esmeril cilíndrico, como

FIGURA 35.6 Operaciones de esmerilado que se usan en el formado del lingote de silicio: *a*) una forma de esmerilado cilíndrico proporciona el control del diámetro y de la redondez y *b*) una superficie plana en el cilindro.

se muestra en la figura 35.6 *a*), que se usa para dar forma al lingote como un cilindro más perfecto, debido a que el proceso de crecimiento de cristales no consigue un control suficiente sobre los parámetros de diámetro y redondez. Una o más superficies planas se pulen a lo largo de la longitud del lingote, como en la figura 35.6b. Después de haber cortado las obleas del lingote, estas superficies planas tienen varias funciones: 1) identificación, 2) orientación de los CI en relación con la estructura del cristal y 3) localización mecánica durante el procesamiento.

Ahora, el lingote está listo para cortarse en obleas, usando el proceso de corte abrasivo que se ilustra en la figura 35.7. En esta técnica se usa una sierra de un filo muy delgado con grano de diamante pegado al diámetro interno que sirve como filo de corte. La utilización del diámetro interno para hacer el corte, en lugar del diámetro externo de la sierra, proporciona un mejor control sobre el nivel, el espesor, el paralelismo y las características de superficie de la oblea. Las obleas se cortan aproximadamente a un espesor de 0.5-0.7 mm (0.020 a 0.028 in), dependiendo del diámetro (un mayor espesor para un diámetro superior de la oblea). Por cada corte de oblea se desperdicia cierta cantidad de silicio, debido al espesor de la sierra. Para minimizar la pérdida debida a este corte, los filos se hacen lo más delgados posible, alrededor de 0.33 mm (0.013 in).

Posteriormente la oblea debe prepararse para los procesos subsecuentes y el manejo en la fabricación del CI. Después de hacer el rebanado, los extremos de las obleas se redondean utilizando una operación de esmerilado del contorno, como se muestra en la figura 35.8a. Esto reduce la formación de astillas en los bordes de la oblea durante el manejo y minimiza la acumulación de soluciones fotorresistentes en los bordes de las obleas. Después, las obleas se atacan químicamente para remover el daño que se haya producido en las superficies durante el corte. Luego, se realiza una operación de esmerilado plano para obtener superficies muy suaves que aceptarán los procesos de fotolitografía subsecuentes. El paso de esmerilado, que se observa en la figura 35.8b, utiliza una pasta aguada de partículas de sílice (SiO_2) muy finas en una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH). El NaOH oxida la superficie de la oblea de silicio, y las partículas abrasivas remueven las capas oxidadas de la superficie, aproximadamente 0.025 mm (0.001 in) de cada lado durante el esmerilado. Por último, la oblea se limpia químicamente para remover los residuos y las películas orgánicas.

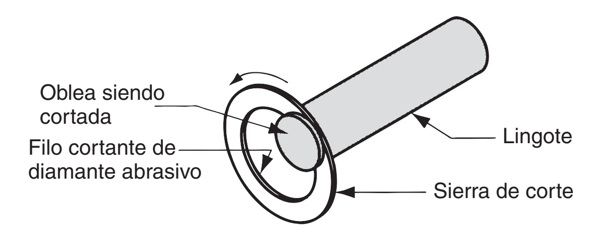


FIGURA 35.7 Rebanado de la oblea usando una sierra de corte de diamante abrasivo.

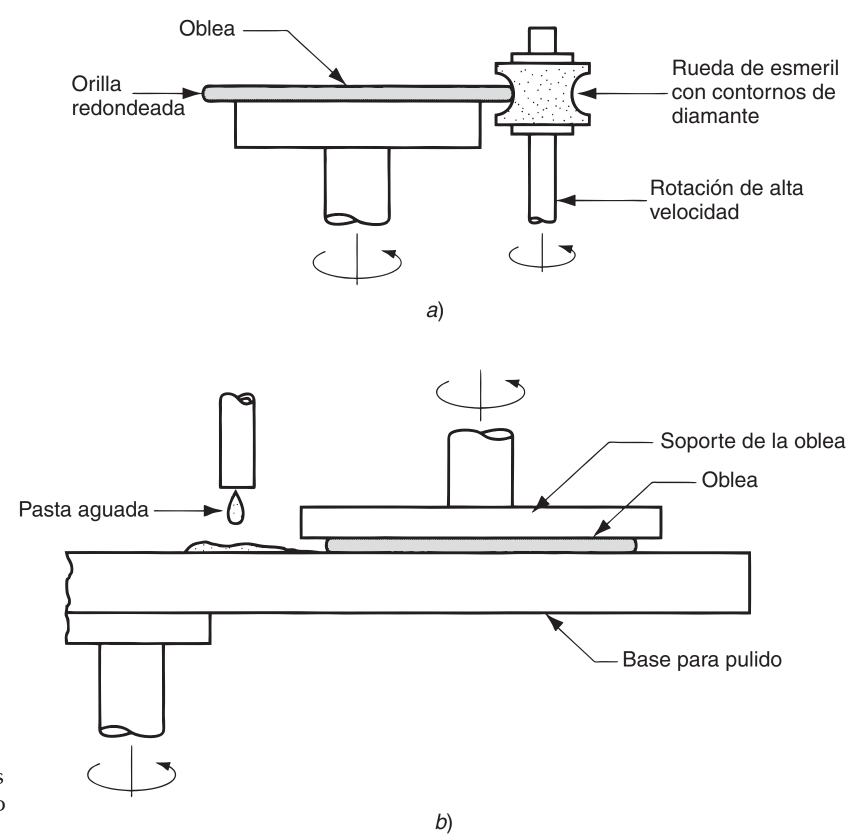


FIGURA 35.8 Dos de los pasos en la preparación de una oblea: *a*) esmerilado del contorno para redondear las orillas de la oblea y *b*) pulido de la superficie.

Resulta de interés saber cuántos chips de CI pueden fabricarse con una oblea de un tamaño dado. El número depende del tamaño del chip en relación con el tamaño de la oblea. Si se supone que los chips son cuadrados, puede usarse la siguiente ecuación para estimar el número de chips en la oblea:

$$nc = 0.34\left(\frac{D_w}{L_c}\right)^{2.25} \tag{35.3}$$

donde n_c = número estimado de chips en la oblea; D_w = diámetro del área procesable de la oblea, supuesta circular, mm (in); y L_c = dimensión lateral del chip, supuesta cuadrada, mm (in). El diámetro del área procesable de la oblea será un poco menor que el diámetro exterior de la oblea. El número real de chips en la oblea puede ser diferente al valor dado por la ecuación (35.3), dependiendo del modo en que los chips se acomodan en la oblea.

35.3 LITOGRAFÍA

Un CI consiste en muchas regiones microscópicas sobre la superficie de la oblea que constituyen los transistores, otros dispositivos y las intraconexiones en el diseño del circuito. En el proceso planar, las regiones se fabrican mediante una secuencia de pasos; cada paso agrega otra capa a las áreas seleccionadas de la superficie. La forma de cada capa se determina mediante un patrón geométrico que representa la información acerca del diseño del circuito, el cual se transfiere a la superficie de la oblea por medio de un procedimiento

conocido como litografía, que básicamente es el mismo procedimiento que han utilizado artistas e impresores durante siglos.

En el procesamiento de semiconductores se utilizan varias tecnologías litográficas: 1) fotolitografía, 2) litografía con electrones, 3) litografía con rayos X y 4) litografía con iones. Las diferencias entre estas técnicas consisten en el tipo de radiación que se utiliza para transferir el patrón de la mascarilla a la superficie mediante la exposición del material fotorresistente. La técnica tradicional es la fotolitografía, y la mayor parte del análisis se centrará en este tema. El lector puede recordar que este método se utiliza en algunos procesos de maquinado químico (sección 26.4).

35.3.1. Fotolitografía

La ***fotolitografía***, también conocida como ***litografía óptica***, utiliza la radiación de la luz para exponer una cubierta de material fotorresistente sobre la superficie de la oblea de silicio; una mascarilla que contiene el patrón geométrico requerido para cada capa separa la fuente de luz de la oblea, de manera que sólo quedan expuestas las porciones del material fotorresistente que no están cubiertas por la mascarilla. La ***mascarilla*** consiste en una lámina plana de vidrio transparente, sobre la cual se ha depositado en algunas áreas una película delgada de una sustancia opaca para formar el patrón deseado. El espesor de la lámina de vidrio es de aproximadamente 2 mm (0.080 in), mientras que la película que se deposita mide apenas algunos μm; ciertos materiales de la película tienen un espesor menor a 1 μm. La mascarilla misma se fabrica mediante litografía; el patrón se basa en los datos del diseño del circuito, usualmente en forma de salida digital que se obtienen del sistema CAD que usa el diseñador de circuitos.

Fotorresistentes Un material ***fotorresistente*** es un polímero orgánico sensible a la radiación de la luz dentro de cierto rango de longitudes de onda; la sensibilidad provoca un incremento o un decremento en la solubilidad del polímero, respecto a ciertos productos químicos. La práctica típica en el procesamiento de semiconductores es utilizar los materiales fotorresistentes sensibles a la luz ultravioleta. La luz UV tiene una longitud de onda más corta que la de la luz visible, y permite una imagen más fina de los detalles microscópicos del circuito sobre la superficie de la oblea. También permite que las áreas de fabricación y de fotorresistencia en la planta se iluminen a niveles de luz bajos fuera de la banda UV.

El desempeño del material fotorresistente se caracteriza por las siguientes medidas [3]: 1) la adhesión a la superficie de la oblea, 2) la resistencia a los agentes químicos, cuánto soporta la resistencia en sí el efecto del ataque químico, 3) la resolución, un término que se utiliza para describir la anchura mínima de los elementos y el espaciado que puede transferirse de la mascarilla a la superficie de la oblea y 4) la fotosensibilidad, que es una medida de la respuesta a intensidades de luz crecientes.

Existen dos tipos de materiales fotorresistentes: positivos y negativos. Una ***resistencia positiva*** se vuelve más soluble en soluciones de revelado después de exponerse a la luz. Una ***resistencia negativa*** se vuelve menos soluble (el polímero hace enlaces y se endurece) cuando se expone a la luz. En la figura 35.9 se ilustra la operación de los dos tipos de resistencias. La ventaja principal de la resistencia positiva es una mejor resolución. Las resistencias negativas tienen una mejor adhesión a superficies de SiO_2 y a superficies metálicas, una buena resistencia a solventes químicos, una alta sensibilidad y bajo costo.

Técnicas de exposición Las resistencias se exponen a través de la mascarilla por medio de alguna de las tres técnicas de exposición: *a*) impresión por contacto, *b*) impresión por proximidad y *c*) impresión por proyección, que se ilustran en la figura 35.10. En la ***impresión por contacto***, la mascarilla se presiona contra el recubrimiento resistente durante la exposición. Esto da como resultado una alta resolución del patrón en la superficie de la oblea; una desventaja importante es que el contacto físico con las obleas gasta gradualmente la mascarilla. En la ***impresión por proximidad***, la mascarilla se separa del recubrimiento resistente a una distancia aproximada que va de 10 a 25 μm (0.0004 a 0.001 in). Esto elimina

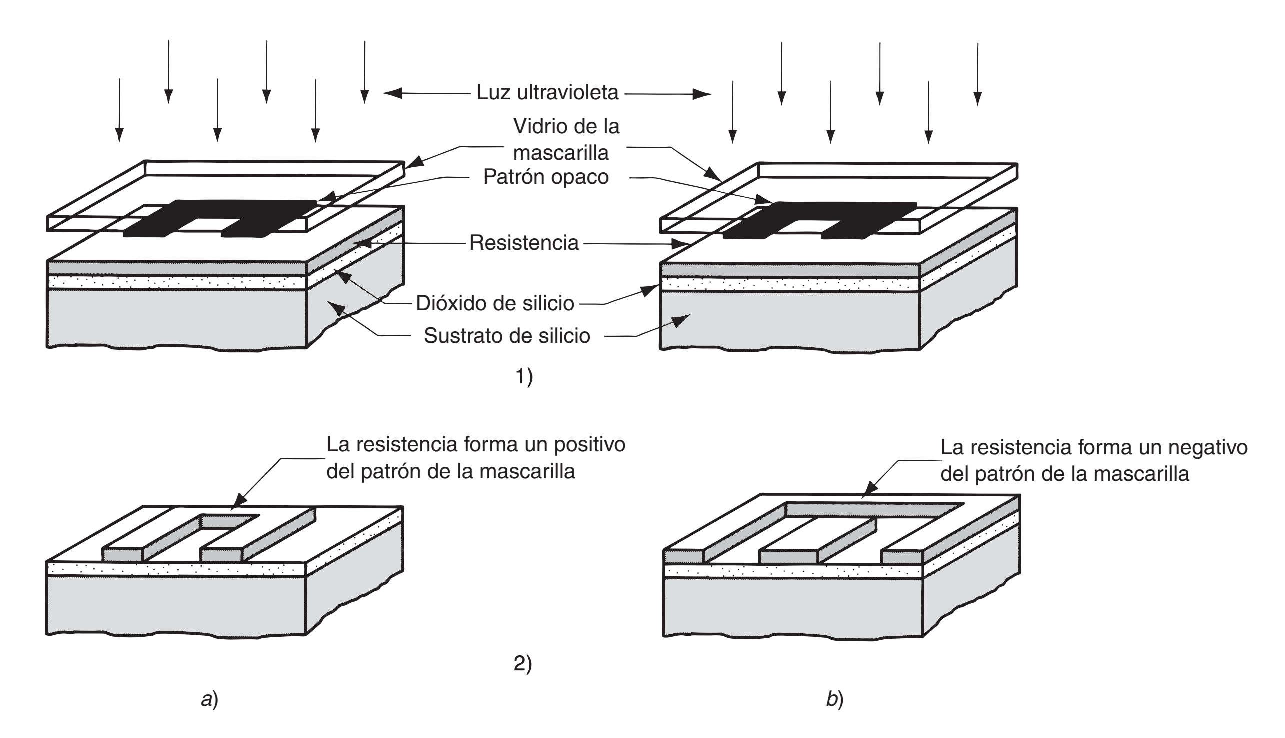
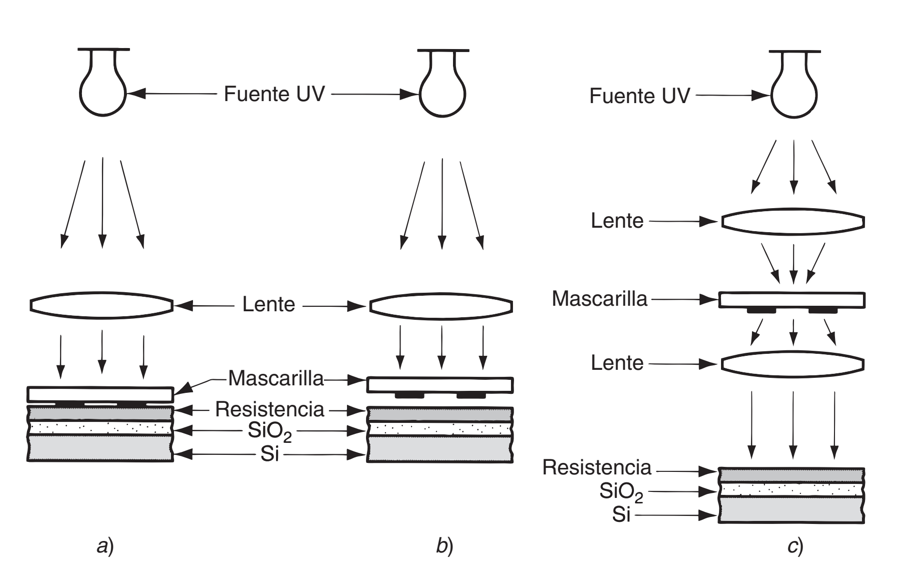


FIGURA 35.9 Aplicación de: *a*) resistencia positiva y *b*) resistencia negativa, en la fotolitografía; para ambos tipos, la secuencia muestra: 1) la exposición a través de la mascarilla y 2) la resistencia que queda después del revelado.

el desgaste de la mascarilla, pero la resolución de la imagen se reduce ligeramente. La ***impresión por proyección*** implica la utilización de un sistema de lentes (o espejos) de alta calidad para proyectar la imagen a través de la mascarilla sobre la oblea. Ésta se ha convertido en la técnica preferida debido a que no hace ningún contacto (de este modo, la mascarilla no se desgasta) y el patrón de la mascarilla se reduce mediante proyección óptica para obtener una alta resolución.

Secuencia de procesamiento en la fotolitografía Se examinará una secuencia de procesamiento típica para una oblea de silicio en la cual se utiliza la fotolitografía. La superficie del silicio se ha oxidado para formar una película delgada de SiO_2 en la oblea. Se desea remover la película de SiO_2 en algunas regiones como lo define el patrón de la mascarilla. La secuencia para una resistencia negativa procede del modo que se ilustra en la figura 35.11. 1) ***Preparación de la superficie***. La oblea se limpia de manera adecuada para promover

FIGURA 35.10 Técnicas de exposición para la fotolitografía: *a*) impresión por contacto, *b*) impresión por proximidad y *c*) impresión por proyección.



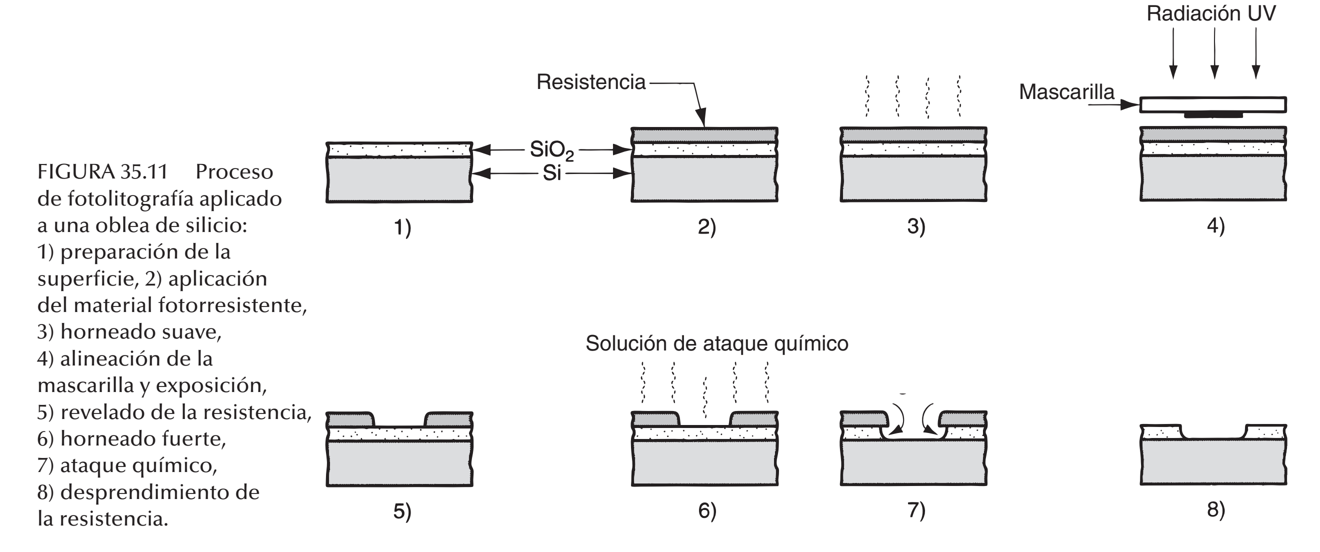


FIGURA 35.11 Proceso de fotolitografía aplicado a una oblea de silicio: 1) preparación de la superficie, 2) aplicación del material fotorresistente, 3) horneado suave, 4) alineación de la mascarilla y exposición, 5) revelado de la resistencia, 6) horneado fuerte, 7) ataque químico, 8) desprendimiento de la resistencia.

el nivel de humedad y de adhesión de la resistencia. 2) ***Aplicación de material fotorresistente***. En el procesamiento de semiconductores, los materiales fotorresistentes se aplican alimentando una cantidad medida de una resistencia líquida sobre el centro de la oblea y después haciendo girar la oblea para expandir el líquido y obtener un espesor uniforme del recubrimiento. El espesor deseado es de aproximadamente 1 μm (0.00004 in), lo cual proporciona una buena resolución y minimiza defectos de pequeños orificios. 3) ***Horneado suave.*** El propósito de este prehorneado es remover solventes, promover la adhesión y endurecer la resistencia. Las temperaturas típicas para el horneado suave están alrededor de 90 °C (190 °F) por un tiempo de 10 a 20 minutos. 4) ***Alineación de la mascarilla y exposición***. En este paso, la mascarilla de patrón se alinea en relación con la oblea y la resistencia se expone a través de la mascarilla mediante uno de los métodos descritos con anterioridad. La alineación debe realizarse con alta precisión, utilizando equipo óptico mecánico diseñado de manera específica para este propósito. Si la oblea se procesó anteriormente mediante litografía de modo que un patrón ya se ha formado en ella, las mascarillas subsecuentes deben registrarse con exactitud en relación con el patrón existente. La exposición de la resistencia depende de la misma regla básica que en la fotografía; la exposición es una función de la intensidad de la luz × tiempo. Se usa una lámpara de arco de mercurio u otra fuente de luz UV. 5) ***Revelado de la resistencia***. Enseguida, la oblea expuesta se sumerge en una solución de revelado, o la solución se esparce sobre la superficie de la oblea. Para la resistencia negativa en el ejemplo, las áreas no expuestas se disuelven en la sustancia de revelado; de esta manera dejan al descubierto la superficie de SiO_2 en estas áreas. Por lo general, después del revelado se aplica un enjuague para detenerlo y para remover los químicos residuales. 6) ***Horneado fuerte***. Durante el horneado se remueven las sustancias volátiles que quedan de la solución de revelado y se aumenta la adhesión de la resistencia, especialmente en las orillas de la película de resistencia que acaba de crearse. 7) ***Ataque químico***. El ataque químico remueve la capa de SiO_2 en las regiones seleccionadas donde la resistencia se ha removido. 8) ***Desprendimiento de la resistencia***. Después del ataque químico, debe removerse el recubrimiento de resistencia que queda en la superficie. La eliminación se lleva a cabo utilizando técnicas húmedas o en seco. El desprendimiento húmedo utiliza líquidos químicos: es común una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno (H_2SO_4–H_2O_2). El desprendimiento en seco utiliza el ataque químico con plasma e incluye el oxígeno como gas reactivo.

Aunque el ejemplo expuesto describe el uso de la fotolitografía para remover una película delgada de SiO_2 de un sustrato de silicio, se sigue el mismo procedimiento básico para otros pasos del procesamiento. El propósito de la fotolitografía en todos estos pasos es exponer regiones específicas bajo la capa de material fotorresistente, de modo que el proceso pueda realizarse sobre las regiones expuestas. En el procesamiento de una oblea dada, la

fotolitografía se repite tantas veces como sea necesario para producir el circuito integrado deseado y utiliza cada vez una mascarilla diferente para definir el patrón adecuado.

35.3.2 Otras técnicas de litografía

Mientras el tamaño de los circuitos integrados continúe disminuyendo y la fotolitografía convencional de UV se vuelva cada vez menos adecuada, aumentarán en importancia otras técnicas de litografía que ofrecen una resolución más alta. Estas técnicas son la litografía ultravioleta extrema, la litografía con haz de electrones, la litografía con rayos X y la litografía con iones. En los siguientes párrafos se proporcionan breves descripciones de estas opciones. Para cada técnica se requieren materiales resistentes especiales que reaccionan al tipo de radiación particular.

La ***litografía ultravioleta extrema*** (EUV) representa un refinamiento de la litografía UV convencional a través del uso de longitudes de onda más cortas durante la exposición. El espectro de la longitud de onda ultravioleta va de 10 nm a 380 nm (nm = nanómetro = 10^{-9} m) y su extremo superior está cerca del rango de la luz visible (longitudes de onda aproximadamente de 400 a 700 nm). La tecnología EUV permite que el tamaño de un circuito integrado se reduzca a alrededor de 0.04 μm, comparado con 0.1 μm con exposición UV convencional.

La ***litografía con haz de electrones*** (***haz E***) presenta la ventaja de una longitud de onda más corta comparada con la fotolitografía UV; así se elimina virtualmente la difracción durante la exposición de la resistencia y permite una resolución más alta de la imagen. Otra ventaja potencial es que un haz de electrones puede dirigirse para exponer sólo ciertas regiones de la superficie de la oblea, y por lo tanto se elimina la necesidad de una mascarilla. Desafortunadamente, los sistemas de haces de electrones de alta calidad son demasiado costosos. Asimismo, debido a una naturaleza secuencial que consume mucho tiempo por el método de exposición, las velocidades de producción son bajas comparadas con las técnicas de mascarilla de la litografía óptica. Por esta razón, la utilización de la litografía con haz de electrones tiende a estar limitada a cantidades de producción pequeñas. Las técnicas con haz de electrones se utilizan ampliamente en la elaboración de las mascarillas para litografía UV.

La ***litografía con rayos X*** ha estado desarrollándose desde 1972. Igual que en la litografía con haz de electrones, las longitudes de onda de los rayos X son mucho más pequeñas que las de la luz UV (las longitudes de onda de los rayos X van desde 0.005 nm hasta varias docenas de nm, superponiéndose al extremo inferior del rango de la luz UV). De este modo, presentan la promesa de una imagen más fina durante la exposición de la resistencia. Los rayos X son difíciles de enfocar durante la litografía. En consecuencia, se debe utilizar la impresión por proximidad o contacto, y debe usarse una fuente de rayos X pequeña a una distancia relativamente grande de la superficie de la oblea para obtener una buena resolución de la imagen a través de la mascarilla.

Los sistemas de ***litografía con iones*** se dividen en dos categorías: 1) sistemas de haces de iones enfocados, cuya operación es similar a los sistemas de haces de electrones y evita la necesidad de una mascarilla, y 2) los sistemas con mascarilla de haces de iones, los cuales exponen la resistencia a través de una mascarilla mediante impresión por proximidad. Como sucedía con los sistemas de haces de electrones y rayos X, la litografía con iones produce una mejor resolución en la imagen que la fotolitografía con UV convencional.

35.4 PROCESOS DE FORMACIÓN DE CAPAS EN LA FABRICACIÓN DE CI

Los pasos requeridos para producir un circuito integrado involucran procesos químicos y físicos para agregar, alterar o remover regiones de la oblea de silicio que ha sido definida mediante la litografía. Estas regiones constituyen las áreas aislantes, semiconductoras y conductoras que forman los dispositivos y sus intraconexiones en los circuitos integrados. Las capas se fabrican una por una, paso a paso; cada capa tiene una configuración diferente

y cada una requiere una mascarilla fotolitográfica individual, hasta que todos los detalles microscópicos de los dispositivos electrónicos y de las trayectorias conductoras se han construido sobre la superficie de la oblea.

En esta sección se consideran los procesos de la oblea que se utilizan para agregar, alterar y sustraer capas. Entre los procesos que agregan o alteran capas a la superficie están: 1) la oxidación térmica, que se utiliza para acumular una capa de dióxido de silicio sobre el sustrato de silicio; 2) la deposición química de vapor, un proceso versátil utilizado para aplicar varios tipos de capas en la fabricación de circuitos integrados; 3) la difusión e implantación de iones, utilizada para alterar la química de una capa o sustrato existentes; y 4) varios procesos de metalización que agregan capas de metal para proporcionar regiones de conducción eléctrica a la oblea. Por último, 5) se utilizan varios procesos de ataque químico para remover porciones de capas que se han agregado a fin de obtener los detalles deseados en los circuitos integrados.

35.4.1 Oxidación térmica

La oxidación de una oblea de silicio puede realizarse varias veces durante la fabricación de un circuito integrado. El dióxido de silicio (SiO_2) es un aislante, que contrasta con las propiedades semiconductoras del silicio. La facilidad para producir una película delgada de SiO_2 en la superficie de una oblea de silicio es una de las características atractivas del silicio como un material semiconductor.

El dióxido de silicio cumple una serie de funciones importantes en la fabricación de CI [14]: 1) se utiliza como una mascarilla para prevenir la difusión o la implantación de iones de los materiales dopantes en el silicio, 2) puede usarse para aislar dispositivos en el circuito, 3) es un componente crítico en algunos tipos de dispositivos MOS y 4) proporciona aislamiento eléctrico entre los niveles en sistemas de metalización de varios niveles.

Durante la manufactura de semiconductores se utilizan varios procesos para formar el SiO_2, dependiendo del momento en el que debe agregarse el óxido durante la fabricación del chip. El proceso más común es la oxidación térmica, que resulta adecuada para la acumulación de las películas de SiO_2 sobre sustratos de silicio. En la ***oxidación térmica***, la oblea se expone a una atmósfera de oxidación a una temperatura elevada; se usan atmósferas de oxígeno o vapor y se producen las siguientes reacciones, respectivamente:

$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2 \tag{35.4}$$

o bien

$$Si + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2 \tag{35.5}$$

Las temperaturas típicas usadas en la oxidación térmica del silicio varían entre 900 y 1 300 °C (1 650 y 2 350 °F). Al controlar la temperatura y el tiempo, se obtienen películas de óxidos con espesores predecibles. Las películas producidas por la oxidación térmica poseen estructura amorfa, buena uniformidad y baja incidencia de fallas por hundimientos y defectos similares. Las ecuaciones muestran que el silicio en la superficie de la oblea se consume durante la reacción, como se observa en la figura 35.12. Para acumular una película de SiO_2 de un espesor d se requiere una capa de silicio con un espesor de $0.44d$.

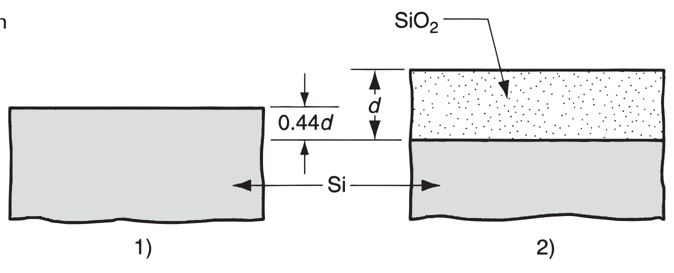


FIGURA 35.12 Acumulación de la película de SiO_2 sobre un sustrato de silicio mediante oxidación térmica mostrando los cambios que ocurren en los espesores: 1) antes de la oxidación y 2) después de la oxidación térmica.

Cuando una película de dióxido de silicio debe aplicarse a superficies diferentes al silicio, la oxidación térmica directa no es adecuada. Se debe utilizar un proceso alternativo, como la deposición química de vapor.

35.4.2 Deposición química de vapor

La deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) implica la acumulación de una película fina sobre la superficie de un sustrato recalentado mediante reacciones químicas o por medio de la descomposición de gases (sección 29.4). La CVD se utiliza ampliamente en el procesamiento de obleas de circuitos integrados para agregar capas de dióxido de silicio, nitruro de silicio (Si_3N_4) y silicio. La deposición química de vapor de plasma se usa con frecuencia porque permite que las reacciones ocurran a temperaturas más bajas.

Reacciones típicas de la CVD en la fabricación de CI En el caso del dióxido de silicio, si la superficie de la oblea es sólo silicio (por ejemplo, al principio de la fabricación del CI), la oxidación térmica es el proceso adecuado mediante el cual se debe formar una capa de SiO_2. Si se va a acumular una capa de óxido sobre materiales diferentes al silicio, como el aluminio o el nitruro de silicio, debe utilizarse una técnica alternativa, como la CVD. La deposición química de vapor del SiO_2 se lleva a cabo haciendo reaccionar con oxígeno un compuesto de silicio como el silano (SiH_4), sobre un sustrato calentado. La reacción se realiza a aproximadamente a 425 °C (800 °F) y puede resumirse del modo siguiente:

$$SiH_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2H_2 \qquad (35.6)$$

La densidad de la película de dióxido de silicio y su adherencia al sustrato generalmente son más deficientes que las que se obtienen mediante la oxidación térmica. En consecuencia, la CVD sólo se utiliza cuando el proceso preferido no es factible, cuando la superficie del sustrato no es silicio o cuando no pueden tolerarse las altas temperaturas que se utilizan en la oxidación térmica. La CVD puede usarse para hacer deposiciones de capas de SiO_2 dopado, como el dióxido de silicio dopado con fósforo (denominado cristal P).

El nitruro de silicio se utiliza como la capa de mascarilla durante la oxidación del silicio. El Si_3N_4 tiene una tasa de oxidación más baja que la del silicio, de manera que se utiliza una mascarilla de nitruro para prevenir la oxidación en las áreas cubiertas de la superficie del silicio. El nitruro de silicio también se utiliza como capa de atenuación (protectora contra la difusión de sodio y la humedad). Un proceso convencional de la CVD para recubrir la oblea de silicio con Si_3N_4 implica la reacción del silano y el amoniaco (NH_3) aproximadamente a 800 °C (1 700 °F) del modo siguiente:

$$3SiH_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12H_2 \qquad (35.7)$$

La CVD mejorada con plasma también se utiliza para tener básicamente la misma reacción de revestimiento; la ventaja es que se realiza a temperaturas mucho más bajas, alrededor de 300 °C (600 °F).

El silicio policristalino (llamado ***polisilicio*** para distinguirlo del silicio que tiene la estructura de un monocristal como la oblea y el boule) tiene una serie de usos en la fabricación de CI, entre los que se incluyen [14]: como material conductor para terminales, electrodos de compuerta en los dispositivos MOS y como material de contacto en los dispositivos de uniones poco profundas. La deposición química de vapor para revestir con polisilicio una oblea implica la reducción del silano a temperaturas de alrededor de 600 °C (1 100 °F), como lo expresa la siguiente fórmula:

$$SiH_4 \rightarrow Si + 2H_2 \qquad (35.8)$$

Deposición epitaxial Un proceso relacionado para acumular una película en un sustrato se denomina ***deposición epitaxial***, que se distingue porque la película tiene una estructura cristalina que es una extensión de la estructura del sustrato. Si el material de la película es el mismo que el del sustrato (por ejemplo, silicio sobre silicio), la rejilla del cristal será idéntica y será la continuación del cristal de la oblea. Existen varias técnicas para realizar

la deposición epitaxial: 1) epitaxia de fase de vapor, 2) epitaxia de fase líquida y 3) epitaxia con haz molecular.

La ***epitaxia de fase de vapor*** es la más importante en el proceso de semiconductores y se basa en la deposición química de vapor. El proceso para acumular silicio sobre silicio se realiza bajo condiciones altamente controladas a temperaturas más altas que las de la CVD convencional del silicio, usando gases diluidos que reaccionan para hacer más lento el proceso, de manera que la capa epitaxial pueda formarse exitosamente. Existen varias reacciones posibles, incluida la ecuación (35.8), pero el proceso industrial de uso más amplio implica la reducción del hidrógeno del gas de tetracloruro de silicio ($SiCl_4$) aproximadamente a 1 100 °C (2 000 °F) del modo siguiente:

$$SiCl_4 + 2H_2 \rightarrow Si + 4HCl \tag{35.9}$$

El punto de fusión del silicio es de 1 410 °C (2 570 °F), de modo que la reacción anterior se lleva a cabo a temperaturas por debajo de la T_m del silicio, lo cual se considera una ventaja para la epitaxia de fase de vapor. Si la película epitaxial se acumula desde la fusión, en lugar de hacerlo desde la fase de vapor, la técnica se llama ***epitaxia de fase líquida***. No es una técnica común en el procesamiento del silicio, pero se utiliza en la fabricación de CI con arsenuro de galio.

La ***epitaxia con haz molecular*** utiliza un proceso de evaporación al vacío (sección 29.3.1), en el cual se vaporiza el silicio junto con otros materiales para revestimiento y se transportan a un sustrato en una cámara al vacío. Su ventaja es que puede llevarse a cabo a temperaturas menores que en la CVD; las temperaturas de procesamiento están entre 400° y 800 °C (750 y 1 450 °F). Sin embargo, la producción es relativamente baja y el equipo es muy costoso.

35.4.3 Introducción de impurezas en el silicio

La tecnología de los CI recae en la capacidad de alterar las propiedades eléctricas del silicio, al introducir impurezas en regiones seleccionadas de su superficie. La adición de impurezas en la superficie del silicio se denomina ***dopado***. El dopado se aplica a las regiones donde se crean las uniones p-n que forman los transistores, diodos y otros dispositivos en el circuito. Se utiliza una mascarilla de dióxido de silicio, la cual se produce mediante oxidación térmica y fotolitografía, para definir las regiones de silicio que serán dopadas. Los elementos comunes que se utilizan como impurezas son el boro (B), el cual forma las regiones receptoras de electrones en el sustrato del silicio (regiones tipo p), y el fósforo (P), el arsénico (As) y el antimonio (Sb) forman las regiones donadoras de electrones (regiones tipo n). Las técnicas mediante las cuales se dopa el silicio con estos elementos son la difusión y la implantación de iones.

Difusión térmica La difusión es un proceso químico en el cual los átomos emigran de regiones de alta concentración a regiones de menor concentración (sección 28.3.1). Las temperaturas altas aceleran el proceso. En el procesamiento de semiconductores, la difusión se realiza para dopar el sustrato de silicio con cantidades controladas de una impureza deseada. Por lo general, esto se lleva a cabo en dos pasos: 1) predeposición y 2) conducción. En la ***predeposición***, la fuente dopante se deposita sobre la superficie de la oblea a una temperatura cercana a 1 000 °C (1 800 °F). El dopante entra a la estructura cristalina de sustrato y sustituye átomos de silicio hasta que se alcanza un límite máximo de concentración para la temperatura de procesamiento.

El paso de ***conducción*** es básicamente un tratamiento térmico en el cual se redistribuye el dopante introducido en la superficie durante la predeposición, para obtener la profundidad y el perfil de concentración adecuados. Este paso se realiza en una atmósfera oxidante para acumular una película protectora de SiO_2 en la parte superior de la región dopada.

Implantación de iones En la ***implantación de iones***, los iones vaporizados del elemento de impureza se aceleran mediante un campo eléctrico y se dirigen hacia la superficie del sustrato de silicio (sección 28.3.2). Los átomos penetran en la superficie, por lo que pierden energía y finalmente se detienen a alguna profundidad en la estructura de cristal; la profundidad

promedio se determina mediante la masa del ion y el voltaje de aceleración. Los voltajes más elevados producen profundidades de penetración más altas, por lo general de varios cientos de angstroms (1 angstrom = 10^{-8} cm). Las ventajas de la implantación de iones están en que puede ejecutarse a temperatura ambiente y proporciona una densidad de dopado exacta.

El problema que existe con la implantación iónica es que los choques de iones dañan y corrompen la estructura reticular de los cristales. Las condiciones de alto nivel energético pueden transformar el material inicial cristalino en una estructura amorfa. Este problema se soluciona recociendo a temperaturas entre 500 y 900 °C (1 000 y 1 800 °F), lo cual permite que la estructura de la rejilla se repare a sí misma y regrese a su estado cristalino. La implantación de iones tiene como resultado penetraciones menores que las que se obtienen mediante difusión, aunque son adecuadas para niveles de una escala de integración muy alta, en los cuales los dispositivos tienen bajas profundidades de impureza. La capacidad de controlar y reproducir la implantación de iones es mejor que en la difusión. Estas ventajas han traído como resultado que la implantación iónica se haya convertido en el proceso preferido para el dopado en la tecnología de semiconductores desde su introducción en la década de 1970.

35.4.4 Metalización

Los materiales conductores deben depositarse sobre la oblea durante el procesamiento para que cumplan varias funciones: 1) formar ciertos componentes (por ejemplo, las compuertas) de los dispositivos en el CI; 2) proporcionar las trayectorias de conducción que interconectan los dispositivos dentro del chip y 3) conectar el chip con los circuitos externos. Para satisfacer estas funciones, los materiales conductores deben formarse en patrones muy finos. El proceso para fabricar estos patrones se conoce como ***metalización*** y combina diferentes tecnologías de deposición de películas finas con la fotolitografía. En esta sección se consideran los materiales y procesos utilizados en la metalización. La conexión del chip con el sistema de circuitos externos también implica el encapsulado del CI, el cual se explora en la sección 35.6.

Materiales para metalización Los materiales que se utilizan en la metalización de los circuitos integrados basados en silicio deben tener ciertas propiedades relacionadas con su función eléctrica, mientras que otras se relacionan con el proceso de manufactura. Las propiedades deseables en un material de metalización son [3], [14]: 1) baja resistividad, 2) baja resistencia de contacto con el silicio, 3) buena adherencia al material subyacente, por lo general silicio o SiO_2, 4) facilidad de deposición, compatible con la fotolitografía, 5) estabilidad química, no corrosivo, no reactivo y no contaminante, 6) estabilidad física durante todas las temperaturas que se encuentran en el procesamiento y 7) buena estabilidad de su tiempo de vida.

Aunque ningún material cumple todos estos requerimientos de manera perfecta, el aluminio satisface la mayoría de ellos bastante bien o en forma adecuada y, por lo tanto, es el material de metalización que se usa con mayor frecuencia. El aluminio generalmente se mezcla con pequeñas cantidades de 1) silicio, para reducir la reactividad con el silicio del sustrato y 2) cobre, para inhibir la electromigración de los átomos de Al que puede provocar el flujo de corriente cuando el CI está en uso. Otros materiales que se usan para la metalización en los circuitos integrados son el polisilicio (Si), el oro (Au), los metales refractarios (por ejemplo, W y Mo), los siliciuros (por ejemplo, WSi_2, $MoSi_2$, $TaSi_2$) y nitruros (por ejemplo, TaN, TiN y ZrN). Estos materiales generalmente se utilizan en aplicaciones tales como las compuertas y los contactos. En general, se prefiere el aluminio para las interconexiones entre los dispositivos y las conexiones de nivel superior para la circuitería externa.

Procesos de metalización Existen varios procesos para ejecutar la metalización en la fabricación de CI: deposición física de vapor, deposición química de vapor y galvanoplastia. Entre los procesos de PVD, puede aplicarse la evaporación al vacío y el bombardeo con partículas atómicas. La ***evaporación al vacío*** (sección 29.3.1) puede aplicarse para la metalización del aluminio. Por lo general, la vaporización se realiza mediante el calentamiento de la resistencia o la evaporación de un haz de electrones. La evaporación es difícil o imposible para metales refractarios y sus compuestos. El ***bombardeo con partículas atómicas*** (sección

29.3.2) puede utilizarse para depositar aluminio, así como metales refractarios y algunos compuestos metalizantes. Tiene una mejor cobertura de paso que la evaporación; esta característica es importante después de muchos ciclos de procesamiento, cuando el contorno de la superficie se ha vuelto irregular. Sin embargo, las velocidades de deposición son inferiores y el equipo es más costoso.

La ***deposición química de vapor*** también se aplica como una técnica de metalización. Sus ventajas de procesamiento incluyen una excelente cobertura del paso y buena tasa de deposición. Los materiales adecuados para la CVD incluyen el tungsteno, el molibdeno y la mayoría de los siliciuros que se utilizan en la metalización de semiconductores. La CVD para la metalización en el procesamiento de semiconductores es menos común que la PVD. Por último, la ***galvanoplastia*** (sección 29.1.1) se utiliza algunas veces en la fabricación de CI para aumentar el espesor de las películas delgadas.

35.4.5 Ataque químico

Todos los procesos anteriores en esta sección incluyen la adición de un material a la superficie de la oblea, ya sea como una película delgada o el dopado de la superficie con un elemento de impureza. Ciertos pasos en la manufactura de CI requieren que se remueva material de la superficie; esto se realiza mediante el ataque químico del material no deseado. El ataque químico usualmente se hace de manera selectiva, cubriendo las áreas de la superficie que deben protegerse y dejando las otras áreas expuestas para su ataque químico. El recubrimiento puede ser con un material fotorresistente o resistente al ataque químico, o puede ser una capa previamente aplicada de un material como el dióxido de silicio. Se mencionó brevemente el ataque químico en el análisis sobre la fotolitografía. Esta sección proporciona algunos de los detalles técnicos de esta etapa en la fabricación de CI.

Existen dos categorías principales del proceso de ataque químico en el procesamiento de semiconductores: ataque químico húmedo y el ataque químico con plasma seco. El ataque químico húmedo es el más antiguo de los dos procesos y el más fácil de utilizar. Sin embargo, se ha evidenciado algunas desventajas ante el creciente uso del ataque químico con plasma.

Ataque químico húmedo El ***ataque químico húmedo*** implica el uso de una solución acuosa, usualmente un ácido, para atacar un material objetivo. La solución se selecciona debido a que ataca químicamente al material específico que ha de removerse y no a la capa protectora que se utiliza como mascarilla. Algunos atacantes comunes que se utilizan para remover materiales en el proceso de las obleas se enlistan en la tabla 35.2.

En su forma más simple, el proceso puede realizarse al sumergir las obleas con sus respectivas mascarillas en un disolvente adecuado por un tiempo específico; inmediatamente después se someten a un proceso completo de enjuague para detener el ataque químico. Las variables del proceso, como el tiempo de inmersión, la concentración del disolvente y la temperatura, son importantes para determinar la cantidad de material que se remueve. Una capa que se ha atacado adecuadamente tendrá el perfil que se muestra en la figura 35.13. Observe que la reacción del ataque químico es ***isotrópica*** (procede de igual modo en todas direcciones), produciendo un corte hacia abajo de la mascarilla protectora. En general, el ataque químico húmedo es isotrópico; por eso el patrón de la mascarilla debe tener el tamaño adecuado para compensar este efecto.

Observe también que el disolvente no ataca a la capa debajo del material objetivo de la ilustración. En el caso ideal, se formula una solución disolvente para que sólo reaccione

TABLA 35.2 Algunos atacantes químicos comunes utilizados en el procesamiento de semiconductores.

Material a remover	Reactivo de ataque químico (usualmente en solución acuosa)
Aluminio(Al)	Mezcla de ácido fosfórico (H_3PO_4), ácido nítrico (HNO_3) y ácido acético (CH_3COOH).
Silicio (Si)	Mezcla de ácido nítrico (HNO_3) y ácido fluorhídrico (HF)
Dióxido de silicio (SiO_2)	Ácido fluorhídrico (HF)
Nitruro de silicio (Si_3N_4)	Ácido fosfórico caliente (H_3PO_4)

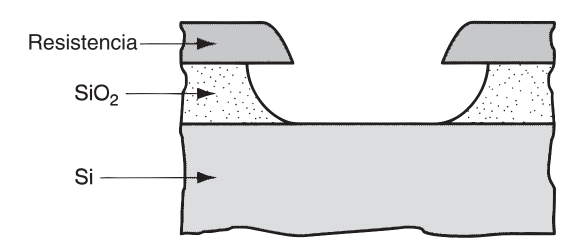


FIGURA 35.13 Perfil de una capa que se ataca químicamente de manera adecuada.

con el material objetivo y no con otros materiales en contacto con él. En casos prácticos, los otros materiales expuestos al disolvente pueden ser atacados, pero en un menor grado que el material objetivo. La ***selectividad de ataque químico*** del disolvente es la relación del rango de disolución entre el material objetivo y algún otro material que se utiliza como mascarilla o como el material de sustrato. Por ejemplo, la selectividad del ataque químico del ácido fluorhídrico para el SiO_2 sobre silicio es infinita.

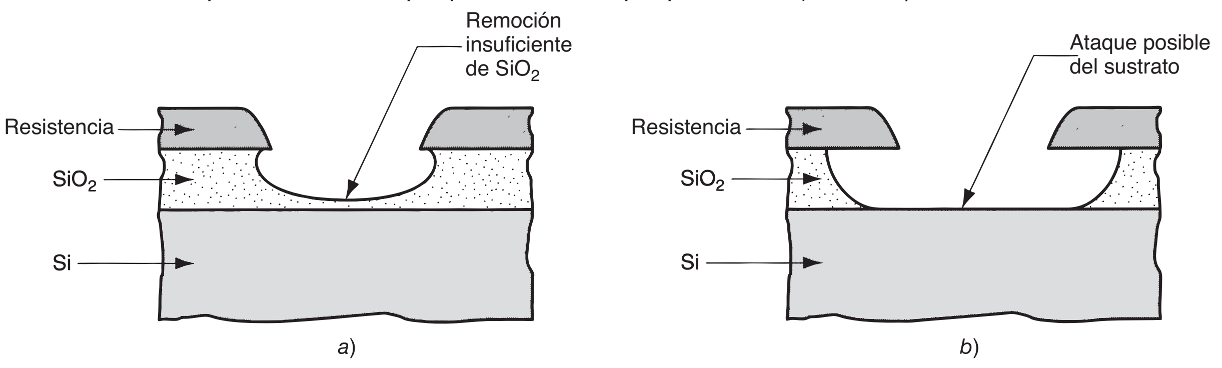
Si el control de proceso no es adecuado, puede ocurrir que el ataque químico sea excesivo o muy débil, como se muestra en la figura 35.14. El ataque débil, en el cual la capa objetivo no se remueve por completo, se produce cuando el tiempo de disolución es demasiado corto o la solución de ataque es demasiado débil. El ataque excesivo implica una pérdida del material objetivo que ha de removerse, con lo cual se pierde la definición del patrón y es posible que se dañe la capa que se encuentra debajo de la capa objetivo. El ataque excesivo se produce por una sobreexposición al atacante químico.

Ataque químico con plasma seco Este proceso de ataque químico usa un gas ionizado para disolver el material objetivo. El gas ionizado se crea al introducir una mezcla adecuada de gases en una cámara al vacío y al utilizar energía eléctrica de radio frecuencia (RF) para ionizar una parte del gas, y de esta manera crear un plasma. El plasma de alta energía reacciona con la superficie objetiva y vaporiza el material que se va a remover. Existen varias formas en las cuales se usa un plasma para disolver un material; los dos procesos principales en la fabricación de CI son el ataque químico con plasma y el ataque químico con iones reactivos.

En el ***ataque químico con plasma***, la función del gas ionizado es generar átomos o moléculas que sean químicamente muy reactivos, para que la superficie objetivo se diluya químicamente con la exposición. Por lo general, los reactivos para el ataque químico con plasma se basan en los gases de flúor o de cloro. En general, la selectividad del ataque químico es más problemática en el ataque químico con plasma que en el ataque químico húmedo. Por ejemplo, la selectividad del ataque químico para el SiO_2 sobre el Si en un proceso de ataque químico con plasma común es en los mejores casos 15 [5], comparado con el número infinito correspondiente al ataque químico con HF.

Una función alternativa del gas ionizado puede ser bombardear físicamente el material objetivo, causando que los átomos salgan expulsados de la superficie. Éste es el proceso de bombardeo con partículas atómicas, una de las técnicas en la deposición de vapores físicos. Cuando se utiliza para ataque químico, el proceso se conoce como ***ataque químico***

FIGURA 35.14 Dos problemas en el ataque químico: *a*) un ataque químico débil y *b*) *un ataque excesivo.*



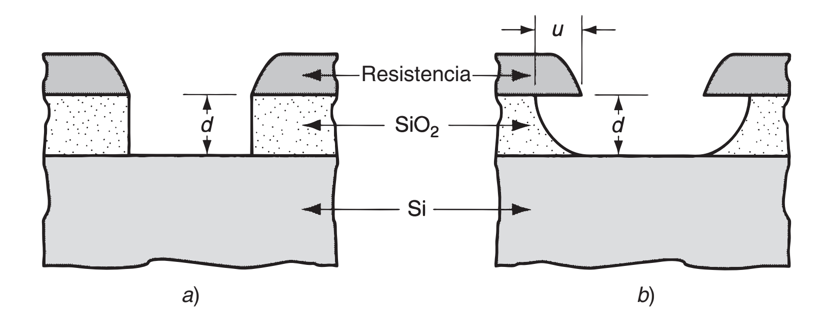


FIGURA 35.l5 *a*) Un ataque químico totalmente anisotrópico con A = ∞ y *b*) un ataque químico parcialmente anisotrópico, con A = 1.3 aproximadamente.

por bombardeo de partículas. Aunque esta forma de ataque químico se ha aplicado en el procesamiento de semiconductores, es mucho más común combinar el bombardeo de partículas con el ataque químico con plasma como se describió antes, lo cual da por resultado el proceso que se conoce como ***ataque químico con iones reactivos***. Esto produce tanto ataques químicos como físicos sobre la superficie objetivo.

La ventaja de los procesos de ataque químico con plasma sobre los de ataque químico húmedo es que los primeros son muy ***anisotrópicos***. Esta propiedad se define rápidamente haciendo referencia a la figura 35.15. En *a*), se muestra un ataque químico totalmente anisotrópico; el corte descendente es cero. El grado en el cual un proceso de ataque químico es anisotrópico se define como la relación:

$$A = \frac{d}{u} \tag{35.10}$$

donde A = grado de anisotropía; d = profundidad del ataque químico, que en la mayoría de los casos será el espesor de la capa diluida; y u = la dimensión del corte hacia abajo, como se ilustra en la figura 35.15b. El ataque químico húmedo usualmente tiene valores de A alrededor de 1.0, que indican un ataque químico isotrópico. Con la deposición electrónica, el bombardeo con partículas atómicas de la superficie es casi perpendicular y provoca valores de A que se aproximan al infinito, casi totalmente anisotrópicos. El ataque químico con plasma y el ataque químico con iones reactivos tienen altos niveles de anisotropía, pero por debajo de los que se consiguen con el ataque químico por bombardeo con partículas atómicas. A medida que los tamaños de los CI continúan disminuyendo, la anisotropía se convierte cada vez más en un factor de importancia para conseguir los niveles de tolerancia de dimensiones requeridos.

35.5 INTEGRACIÓN DE LOS PASOS DE FABRICACIÓN

En las secciones 35.3 y 35.4 se examinaron las tecnologías de procesamiento individuales que se utilizan en la fabricación de CI. En esta sección, se muestra la manera en que estas tecnologías se combinan en la secuencia de pasos para producir un circuito integrado.

La secuencia de procesamiento planar consiste en la fabricación de una serie de capas de materiales diversos en áreas seleccionadas de un sustrato de silicio. Las capas forman regiones aislantes, semiconductoras o conductoras sobre el sustrato, para crear los dispositivos electrónicos particulares que se requieren en el circuito integrado. Las capas también pueden tener la función temporal de enmascarar ciertas áreas, de modo que un proceso en particular sólo se aplique a las partes deseadas de la superficie. Después, se remueve la mascarilla.

Las capas se forman mediante oxidación térmica, acumulación epitaxial, técnicas de deposición (CVD y PVD), difusión e implantación de iones. En la tabla 35.3, se resumen los procesos que se utilizan en forma típica para agregar o alterar una capa de un tipo de material determinado. El uso de la litografía para aplicar un proceso particular sólo a las regiones seleccionadas de una superficie se ilustra en la figura 35.16.

TABLA 35.3 Materiales de capas que se agregan o alteran en la fabricación de CI y en los procesos asociados.

Material de la capa (función)	Proceso típico de fabricación
Si, polisilicio (semiconductor)	CVD
Si, epitaxial (semiconductor)	Epitaxia de fase de vapor
Dopado de Si (tipo n o tipo p)	Implantación iónica, difusión
SiO_2 (aislante, mascarilla)	Oxidación térmica, CVD
Si_3N_4 (mascarilla)	CVD
Al (conductor)	PVD, CVD
Vidrio P (protección)	CVD

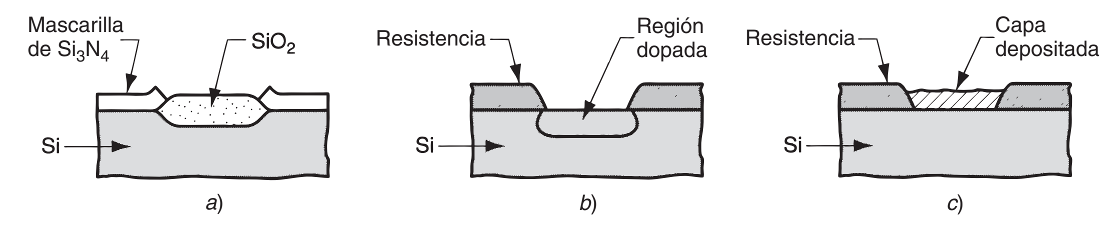
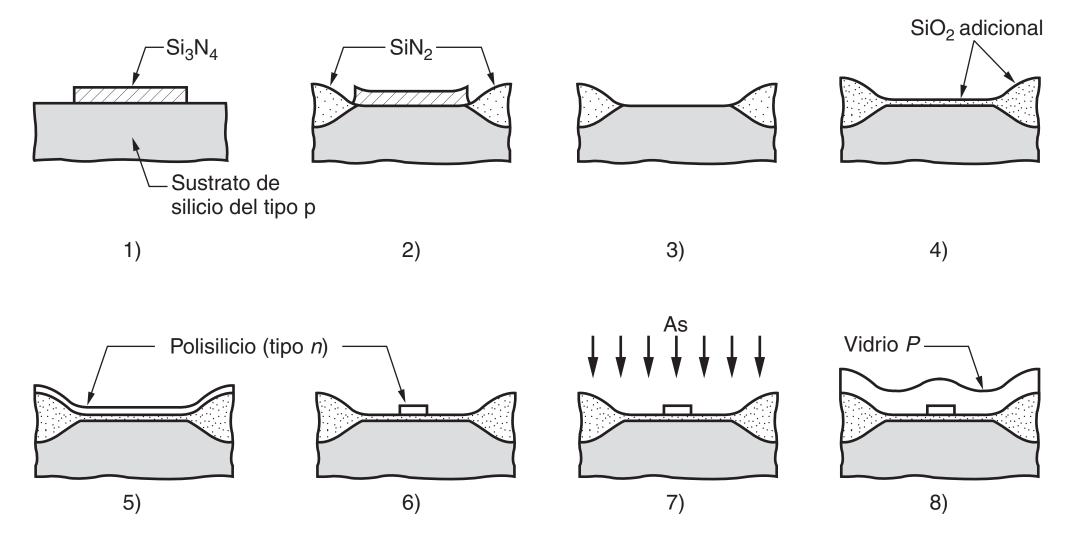


FIGURA 35.16 Formación de capas de manera selectiva mediante el uso de mascarillas *a*) oxidación térmica del silicio, *b*) dopado selectivo, y *c*) deposición de un material sobre un sustrato.

Aquí será de utilidad un ejemplo para mostrar el proceso de integración en la fabricación de CI. Se utilizará un dispositivo lógico semiconductor con una base de óxido metálico (NMOS) de n canales para ilustrar la secuencia de procesamiento. La secuencia para los circuitos integrados NMOS es menos compleja que la que se requiere para los CMOS o las tecnologías bipolares, aunque los procesos para estas categorías de CI son básicamente similares. El dispositivo que se va a fabricar se ilustra en la figura 35.17.

El sustrato inicial es una oblea de silicio ligeramente dopada de tipo p, que formará la base del transistor de n canales. Los pasos del procesamiento se ilustran en la figura 35.17 y se describe aquí (algunos detalles se simplificaron y se omitió el proceso de metalización para los dispositivos de interconexión). 1) Se deposita una capa de Si_3N_4 mediante CVD sobre el sustrato de Si, utilizando fotolitografía para definir las regiones. Esta capa de Si_3N_4

FIGURA 35.17 Secuencia en la fabricación de CI: 1) la mascarilla de Si_3N_4 se deposita mediante CVD en el sustrato de Si, 2) el SiO_2 se acumula mediante oxidación térmica en las regiones sin mascarilla, 3) se desprende la mascarilla de Si_3N_4, 4) se acumula una delgada capa de SiO_2 por medio oxidación térmica, 5) se deposita el polisilicio mediante CVD y se dopa n^+ utilizando la implantación iónica, 6) se ataca química y selectivamente con el polisilicio mediante fotolitografía para definir el electrodo de la compuerta, 7) se forman las regiones fuente y de drenaje por dopado n^+ en el sustrato y 8) se deposita el cristal P sobre la superficie para protección.



servirá como mascarilla para el proceso de oxidación térmica en el siguiente paso. 2) Se acumula el SiO_2 en las regiones expuestas de la superficie, mediante oxidación térmica. Las regiones de SiO_2 se aíslan y serán los medios para que este dispositivo quede aislado de los otros en el circuito. 3) Se remueve la mascarilla de Si_3N_4 mediante ataque químico. 4) Se realiza otra oxidación térmica para agregar una compuerta delgada de óxido a las superficies descubiertas previamente y para aumentar el espesor de la capa anterior de SiO_2. 5) Se deposita polisilicio en la superficie mediante CVD y después se dopa con una carga tipo n utilizando implantación de iones. 6) El polisilicio se ataca en forma selectiva con material químico, utilizando fotolitografía para dejar el electrodo de compuerta del transistor. 7) Se forman las regiones fuente y de drenado (n+) mediante la implantación de iones de arsénico (As) en el sustrato. Se selecciona el nivel de energía de implantación que penetrará la capa delgada de SiO_2, pero no la compuerta de polisilicio o la capa de aislamiento de SiO_2 más gruesa. 8) Se deposita sobre la superficie un cristal de fosfosilicato (vidrio P) mediante CVD, para proteger el sistema de circuitos subyacente.

35.6 ENCAPSULADO DE CI

Al finalizar todos los pasos del procesamiento de la oblea, debe realizarse una serie de operaciones finales para transformar la oblea en chips individuales, listos para conectarse a los circuitos externos y preparados para soportar el ambiente hostil que prevalece fuera de la sala limpia. Estos pasos finales se conocen como encapsulado del CI. (Como se verá en el siguiente capítulo, el encapsulado se extiende más allá de la preparación de los chips individuales para CI).

El encapsulado de circuitos integrados tiene que ver con temas de diseño tales como 1) las conexiones eléctricas con los circuitos externos, 2) los materiales para encapsular los chips y protegerlos del medio (humedad, corrosión, temperatura, vibración, impactos mecánicos), 3) la disipación del calor, 4) el rendimiento, la confiabilidad y vida de servicio y 5) el costo.

También existen aspectos de la manufactura que se relacionan con el encapsulado, entre los cuales están: 1) la separación de los chips, al cortar la oblea en chips individuales, 2) la conexión del chip al encapsulado, 3) el encapsulado del chip y 4) la prueba del circuito. Estos aspectos de manufactura son los de mayor interés en esta sección. Pese a que la mayoría de los temas de diseño se abarcan de manera adecuada en otros textos [7], [10], [13], se examinarán algunos de los aspectos de la ingeniería del encapsulado de CI y los tipos disponibles antes de describir los pasos del proceso de encapsulado para hacerlo.

35.6.1 Diseño del encapsulado de CI

En esta sección se considerarán tres temas relacionados con el diseño del encapsulado de circuitos integrados: 1) el número de terminales de entrada/salida que requiere un CI de un tamaño determinado, 2) los materiales que se utilizan en los encapsulados de circuitos integrados y 3) los estilos de encapsulado.

Determinación del número de terminales de entrada/salida El problema básico de ingeniería en el encapsulado de CI es conectar los diversos circuitos internos a las terminales de entrada/salida (E/S), para que puedan comunicarse las señales eléctricas adecuadas entre el CI y el mundo exterior. Conforme aumenta el número de dispositivos en un CI, también se incrementa el número requerido de conexiones (terminales) de E/S. El problema se agrava con las tendencias en la tecnología de semiconductores que han llevado a disminuciones en el tamaño de los dispositivos y al aumento en la cantidad de los dispositivos que pueden encapsularse en un CI. Por fortuna, el número de terminales de E/S no tiene que ser igual a la cantidad de dispositivos en el CI. La dependencia entre los dos valores se determina por medio de la regla de Rent, llamada así en honor al ingeniero de IBM que definió la siguiente relación, alrededor de 1960:

$$n_{io} = Cn_c^{\,m} \tag{35.11}$$

donde n_{io} = número de terminales de entrada/salida requeridas; n_c = cantidad de circuitos en el CI, usualmente se toma del número de puertas lógicas; y C y m son parámetros en la ecuación.

Los valores comúnmente aceptados para C y m son 4.5 y 0.5 para un circuito microprocesador moderno VLSI [7], [14]. Sin embargo, los parámetros de la regla de Rent dependen del tipo de circuito. Los dispositivos de memoria requieren menos terminales de E/S que los microprocesadores, debido a la estructura de columnas y renglones en las unidades de memoria. Los valores para un dispositivo de memoria estática publicados en [1] son $C = 6.0$ y $m = 0.12$. Un cálculo alternativo del número de terminales de entrada/salida en una memoria estática supone que utiliza la codificación de direcciones para diseñar el dispositivo [7]. Esto permite que las celdas de memoria en el dispositivo se configuren en un arreglo de dos dimensiones y en una tabla de verdad binaria para obtener el acceso a cada celda. Con base en esta suposición, el valor de n_{io} está determinado por

$$n_{io} = 1.4427 \ln(n_c) \tag{35.12}$$

donde n_c = número de celdas de memoria y la constante 1.4427 es 1/ln(2). Puede mostrarse que la configuración mas eficiente de las celdas de memoria en un dispositivo es un arreglo cuadrado (dos dimensiones iguales) y el número total de celdas debe ser una potencia entera de 2, puesto que el número de terminales de E/S n_{io} debe ser un entero.

Materiales para encapsulado de CI El sellado del encapsulado implica cubrir el chip del CI con un material adecuado. Dos tipos de materiales dominan la tecnología de encapsulado actual: cerámico y plástico. El metal se utilizaba en los primeros diseños de encapsulado, pero en la actualidad ya no es de importancia, excepto para las estructuras de las terminales.

El material de encapsulado cerámico común es la alúmina (Al_2O_3). Las ventajas del encapsulado cerámico incluyen un sellado hermético del chip del CI y la capacidad para producir encapsulados de alta complejidad. Las desventajas incluyen un deficiente control de las dimensiones, debido a la contracción durante el quemado y la alta constante dieléctrica de la alúmina.

Los encapsulados plásticos de CI no se sellan herméticamente, pero su costo es menor que el de los cerámicos. Por lo general se utilizan para CI producidos en masa, donde no se requiere una alta confiabilidad. Los plásticos que se utilizan en el encapsulado de CI incluyen los epóxicos, las poliimidas y las siliconas.

Estilos de encapsulado de CI Existe una amplia variedad de estilos de encapsulado para circuitos integrados que cumplen con los requerimientos de entrada/salida que se indicaron con anterioridad. Casi en todas las aplicaciones, el CI es un componente de un gran sistema electrónico y en la mayoría de los sistemas electrónicos debe conectarse a un tablero de circuitos impresos (PCB, por sus siglas en inglés). Existen dos grandes categorías para montar un componente a un PCB, como se muestra en la figura 35.18: montaje de inserción y de superficie. En la ***tecnología de montaje de inserción***, también conocida como tecnología de ***inserción*** (PIH, por sus siglas en inglés), el encapsulado del CI y otros componentes electrónicos (por ejemplo, resistores y capacitores discretos) tienen terminales que se insertan a través de las perforaciones en el tablero y se sueldan por la parte interior. En la ***tecnología de montaje de superficie*** (SMT, por sus siglas en inglés), los componentes se conectan a la

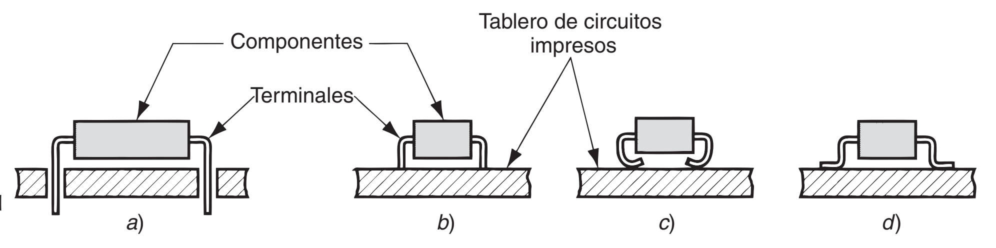


FIGURA 35.18 Tipos de unión de las terminales en un tablero de circuitos impresos: *a*) de inserción y varios estilos de tecnología de montaje en superficie; *b*) terminal empalmada; *c*) terminal en "J"; y *d*) terminal en ala.

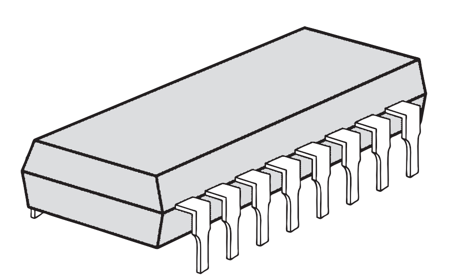


FIGURA 35.19 El encapsulado dual en línea con 16 terminales se muestra aquí, en su configuración de inserción.

superficie del tablero (o en algunos casos a ambas superficies del tablero). En la SMT existen varias configuraciones de terminales, como se ilustra en los incisos b, c y d de la figura.

Entre los principales estilos de encapsulados de CI están: 1) el encapsulado dual en línea, 2) el encapsulado cuadrado y 3) el arreglo en rejilla de pines. Algunos de ellos están disponibles en los dos estilos de montaje, de inserción y de superficie, mientras que otros se diseñan especialmente para un método de montaje.

El ***encapsulado dual en línea*** (DIP, por sus siglas en inglés) es actualmente la forma de encapsulado más común para circuitos integrados, y se encuentra disponible en las configuraciones de montaje de inserción y de superficie. Tiene dos hileras de terminales (conexiones) a cada lado de su cuerpo rectangular, como en la figura 35.19. En el DIP convencional de inserción, el espaciamiento entre las terminales (distancia de centro a centro) es de 2.54 mm (0.1 in) y la cantidad de terminales varía de 8 a 64. El espaciamiento de las perforaciones en el DIP de inserción está delimitado por la capacidad de hacer las perforaciones lo suficientemente cercanas en un tablero de circuitos impresos. Esta limitación puede relajarse en la tecnología de montaje de superficie debido a que las terminales no se insertan en el tablero; el espaciamiento estándar entre terminales para los DIP de montaje de superficie es de 1.27 mm (0.05 in).

El número de terminales en un DIP está limitado por su forma rectangular, en la cual las terminales se proyectan únicamente en dos lados; esto significa que el número de terminales en cualquier lado es $n_{io}/2$. Para valores altos de n_{io} (entre 48 y 64), las diferencias en las longitudes de conducción entre las terminales del centro del DIP y las de los extremos provocan problemas en las características eléctricas de alta velocidad. Algunos de estos problemas se reducen con un encapsulado cuadrado, en el cual las terminales se ordenan en la periferia, de modo que la cantidad de terminales en un lado es $n_{io}/4$. Un ejemplo común de un encapsulado cuadrado es el portador de chips. Los ***portadores de chips*** se utilizan para reducir los requerimientos de espacio del encapsulado comparados con los del DIP y frecuentemente se consideran cuando el número de terminales es mayor de 48. El espaciamiento estándar entre terminales es de 1.27 mm (0.05 in) y el número de terminales puede ser hasta de 124. Los portadores de chips vienen en varias formas, las dos principales categorías son el ***portador de chips con terminales*** (LCC, por sus siglas en inglés), diseñado para el montaje de inserción o de superficie, y el ***portador de chips sin terminales*** (LLCC, por sus siglas en inglés), el cual no tiene terminales y se monta sobre un componente base que se acopla a él. El LCC de montaje de superficie se ilustra en la figura 35.20. Los ***encapsulados cuádruples planos*** ("encapsulados cuadrados") son una versión reducida del portador de chips, diseñado únicamente para la tecnología de montaje en superficie. Su perfil es más delgado y sus terminales (las cuales se proyectan hacia afuera en lugar de hacia abajo) tienen una distancia de centro a centro menor que el portador de chips, hasta de 0.5 mm (0.020 in).

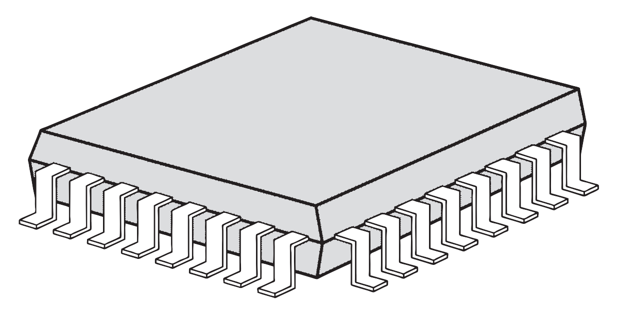


FIGURA 35.20 Portador de chips cuadrado con terminales (LCC) para el montaje en superficie con terminales en ala.

Incluso con un encapsulado cuadrado de chips, existe un límite superior práctico de cantidad de terminales, determinado por el modo en el que se colocan linealmente dentro del encapsulado. La cantidad de terminales del encapsulado se aumenta utilizando una matriz cuadrada de pines. Un ***arreglo en rejilla de pines*** (PGA, por sus siglas en inglés) consiste en un arreglo bidimensional de terminales de pines en la parte interior del encapsulado de un chip cuadrado. El PGA es un encapsulado de inserción, con un espaciamiento entre pines de 2.54 mm (0.1 in). En condiciones ideales, toda la superficie inferior del encapsulado la ocupan los pines, de manera que la cantidad de terminales en cada dirección es la raíz cuadrada de n_{io}. Sin embargo, por consideraciones prácticas, el área central del encapsulado no tiene pines debido a que esta región contiene el chip del CI.

35.6.2 Pasos del procesamiento en el encapsulado de CI

En manufactura, el encapsulado de un chip de CI se divide en los siguientes pasos: 1) pruebas de la oblea, 2) separación de los chips, 3) unión de los dados, 4) unión de alambres y 5) sellado del encapsulado. Después del encapsulado, se realiza una prueba final funcional en cada CI encapsulado.

Prueba de la oblea Las técnicas de procesamiento de semiconductores actuales proporcionan varios cientos de CI individuales por oblea. Es conveniente realizar ciertas pruebas funcionales en los circuitos integrados mientras todavía están juntos en la oblea, es decir, antes de la separación de los dados. Las pruebas se realizan en equipos controlados por computadoras, los cuales utilizan un conjunto de sondas de punta, configurados de manera que correspondan a las almohadillas de conexión sobre la superficie del chip; para este procedimiento de prueba se utiliza el término ***multiprueba***. Cuando las sondas entran en contacto con las conexiones, se realiza una serie de pruebas de corriente directa para indicar cortocircuitos y otras fallas; a esto le sigue una prueba funcional del CI. Los chips que no pasan la prueba se marcan con un punto de tinta; estos defectuosos no se encapsulan. Cada CI se coloca uno a la vez debajo de las sondas para prueba, utilizando una tabla *x-y* de alta precisión para indexar la oblea desde el lugar de un chip hasta el siguiente.

Separación de los chips El siguiente paso después de la prueba consiste en cortar la oblea en chips individuales. Se utiliza una navaja delgada con punta de diamante para realizar la operación de corte. La máquina de corte es altamente automática y su alineación con los “canales”, entre los circuitos, es muy exacta. La oblea se adhiere a un pedazo de tela adhesiva, el cual a su vez se monta en un marco. La tela adhesiva sostiene los chips individuales en su lugar durante y después del proceso de corte; el marco es un elemento conveniente en los pasos subsecuentes para el manejo de las pastillas. Los chips con puntos de tinta ahora se descartan.

Unión de dados Los chips individuales ahora deben unirse a sus encapsulados individuales, un procedimiento denominado unión de dados. Debido al tamaño miniatura de éstos, se utilizan sistemas de manejo automatizados para levantar los chips separados del marco de cinta y colocarlos para su unión. Se han desarrollado varias técnicas para unir el chip al sustrato del encapsulado; se describen dos métodos que parecen ser los más importantes en la actualidad. La unión eutéctica de dados y la unión epóxica de dados. La ***unión eutéctica de dados***, utilizada para los encapsulados de cerámica, consiste en los siguientes pasos: 1) se deposita una película delgada de oro sobre la superficie inferior de la pastilla, 2) la base del encapsulado cerámico se calienta a una temperatura superior a los 370 °C (698 °F), la temperatura eutéctica del sistema Au-Si, y 3) el chip se une al patrón de metalización de la base calentada. En la ***unión epóxica de dados***, usada para los encapsulados plásticos de VLSI, se utiliza una pequeña cantidad de epóxico en la base del encapsulado (la estructura de las terminales) y el chip se coloca sobre el epóxico; éste se vulcaniza, uniendo el chip con la superficie.

Unión de alambres Después de que el dado se une al encapsulado, se hacen las conexiones eléctricas entre las almohadillas de contacto en la superficie del chip y las terminales

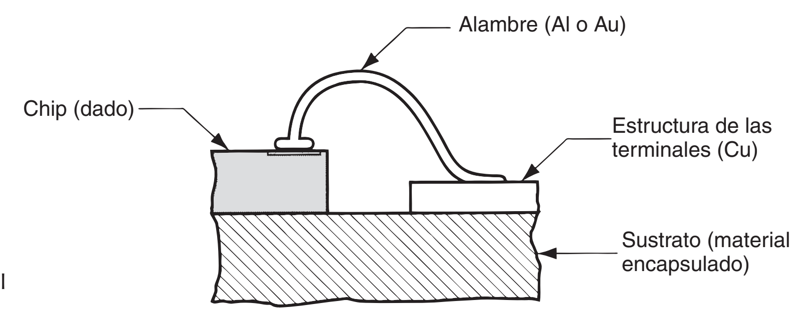


FIGURA 35.21 Conexión de alambres típica entre la almohadilla de contacto del chip y las terminales.

del encapsulado. Las conexiones se hacen generalmente utilizando alambres de pequeño diámetro de aluminio u oro, como se ilustra en la figura 35.21. Los diámetros comunes de los alambres de aluminio son de 0.05 mm (0.002 in), y para los alambres de oro son de aproximadamente la mitad de ese diámetro (el Au tiene una conductividad eléctrica superior a la del Al, pero es más caro). Los alambres de aluminio se unen mediante un procedimiento ultrasónico, mientras que los de oro se unen mediante métodos de termocompresión, termosónicos o ultrasónicos. La ***unión ultrasónica*** utiliza la energía ultrasónica para fundir el alambre con el punto de conexión de la superficie. La ***unión por termocompresión*** implica el calentamiento de un extremo del alambre para formar una esfera fundida; después la esfera se presiona contra el punto de conexión y forma la unión. La ***unión termosónica*** combina las energías ultrasónica y térmica para realizar la unión. Se utilizan máquinas automáticas de unión con alambre para realizar estas operaciones a velocidades de hasta 200 uniones por minuto.

Sellado del encapsulado Como se mencionó con anterioridad, los dos materiales comunes para el encapsulado son la cerámica y el plástico. Los métodos de procesamiento son diferentes para los dos materiales. Los ***encapsulados de cerámica*** se hacen a partir de una dispersión de polvos de cerámica (Al_2O_3 es el más común) en un líquido de unión (por ejemplo, un polímero y un solvente). Primero, la mezcla se forma como hojas pequeñas y se seca y después se corta a la medida. Se hacen perforaciones para las interconexiones. Posteriormente se fabrican las trayectorias de alambrado que se requieran en cada una de las hojas, y el metal se introduce en las perforaciones. Enseguida, se laminan las hojas mediante presión y sinterizado para formar un cuerpo monolítico (de una sola piedra).

Un encapsulado cerámico alternativo y de menor costo implica el sellado del chip de CI entre dos placas de cerámica utilizando un vidrio refractario, típicamente, vidrio PbO-ZnO-B_2O_3 cuyo punto de fusión es alrededor de 400 °C (750 °F). Lo anterior proporciona un sellado hermético, pero no es capaz de dar la complejidad de los encapsulados cerámicos más convencionales. La técnica tiene el nombre de CERDIP (que significa DIP de cerámica de vidrio sellado) y CERQUAD para el mismo proceso aplicado a los encapsulados cuádruples.

Existen dos tipos de ***encapsulados plásticos***: posmoldeados y premoldeados. En los ***encapsulados posmoldeados*** se moldea un plástico termofijo de epóxico alrededor de un chip ensamblado y su estructura de terminales (después de la unión de los alambres), transformando, de hecho, las piezas en un cuerpo sólido único. Sin embargo, el proceso de moldeado resulta un tanto rudo para los alambres delicados, y los encapsulados premoldeados representan una alternativa. En el ***encapsulado premoldeado,*** antes del encapsulado se moldea una base de sujeción y después se conectan a ella el chip y la estructura de terminales, agregando una cubierta sólida u otro material para darle protección. Los pasos adicionales del ensamble hacen que este método de producción sea más costoso que el de posmoldeado.

Pruebas finales Después de terminar la secuencia de encapsulado, cada CI debe someterse a una prueba final para: 1) determinar qué unidades se han dañado durante el encapsulado, si esto ha sucedido, y 2) medir las características de rendimiento de cada dispositivo.

Los procedimientos de prueba de calentamiento algunas veces incluyen pruebas a temperaturas elevadas, en las cuales el CI encapsulado se coloca en un horno a temperaturas alrededor de 125 °C (250 °F) durante 24 horas y después se prueba. Es muy probable que un dispositivo que no pasa esta prueba pueda fallar muy pronto durante su uso. Si se pretende

que el dispositivo esté en ambientes donde ocurren amplias variaciones de temperatura, lo adecuado es una prueba de ciclo de temperaturas. Esta prueba somete a cada dispositivo a una serie de cambios de temperatura, entre valores que van desde –50°C (–60°F) en su límite inferior hasta 125 °C (250 °F) en su límite superior. Entre los exámenes adicionales para dispositivos que requieren una alta confiabilidad se incluyen las pruebas de vibraciones mecánicas y las pruebas de hermeticidad (fugas).

35.7 RENDIMIENTOS EN EL PROCESAMIENTO DE CI

La fabricación de los circuitos integrados se realiza en muchos pasos de procesamiento en secuencia. En el procesamiento de obleas en particular, puede haber docenas de operaciones distintas a través de las cuales pasa la oblea. En cada paso existe una posibilidad de que algo pueda fallar, lo que dará por resultado la pérdida de la oblea o de porciones de ella que corresponden a chips individuales. Un modelo simple de probabilidad para predecir los rendimientos finales de un buen producto es:

$$Y = Y_1 Y_2 \ldots Y_n \qquad (35.13)$$

donde Y = rendimiento final; Y_1, Y_2, Y_n son los rendimientos en cada paso del procesamiento; y n = el número total de pasos en la secuencia de procesamiento.

Este modelo, aunque es perfectamente válido, es difícil de utilizar en la práctica debido a la gran cantidad de pasos involucrados y a la variabilidad de los rendimientos en cada paso. Resulta más conveniente dividir la secuencia de procesamiento en fases mayores, como se ha organizado el análisis de la secuencia en este capítulo (véase la figura 35.3), y definir los rendimientos para cada fase. La primera fase implica la acumulación del boule del monocristal. El término ***rendimiento del cristal*** Y_c se refiere a la cantidad de material del monocristal en el boule comparada con la cantidad inicial de silicio de grado electrónico. El rendimiento común de cristal es aproximado a 50%; con el reciclaje, esta cantidad aumenta hasta 65%. Después de la acumulación cristalina, el boule se corta en obleas, el rendimiento para cada una se describe como el ***rendimiento de cristal por rebanada*** Y_s. Esto depende de la cantidad del material que se pierde durante el esmerilado del boule, el espesor de la navaja en relación con el espesor de la oblea durante el corte y otras pérdidas. Un valor común podría ser de 50%, aunque gran parte del silicio perdido durante el esmerilado y el corte es reciclable.

La siguiente fase es el procesamiento de la oblea para fabricar los CI individuales. Desde el punto de vista de rendimiento, esto se divide en rendimiento de la oblea y de los multisondeos. El ***rendimiento de la oblea*** Y_w se refiere al número de obleas que sobreviven al procesamiento, comparado con la cantidad inicial. Algunas obleas se diseñan como piezas de prueba o tienen usos similares y, por lo tanto, provocan pérdidas y una reducción en el rendimiento; en otros casos, las obleas se rompen o las condiciones de procesamiento fallan. Los valores comunes de rendimiento en obleas son cercanos a 70% si se incluyen las pérdidas en las pruebas, y 90% o más si se excluyen. De las obleas que se someten al proceso y se prueban con el multisondeo, sólo cierta proporción de ellas pasa la prueba y se denomina ***rendimiento de multisondeo*** Y_m. El rendimiento de multisondeo es muy variable y puede ir desde valores muy bajos (menores a 10%) hasta valores relativamente altos (mayores a 90%), dependiendo de la complejidad del CI y de las habilidades de los obreros en las áreas de procesamiento.

Después del encapsulado, se realiza la prueba final del CI. Esto producirá invariablemente pérdidas adicionales, lo que da por resultado un ***rendimiento de prueba final*** Y_t en el rango de 90 a 95%. Si se combinan los rendimientos de las cinco fases como en la ecuación (35.13), el rendimiento final puede estimarse mediante

$$Y = Y_c Y_s Y_w Y_m Y_t \qquad (35.14)$$

Dados los valores típicos en cada paso, el rendimiento final es bastante bajo comparado con la cantidad inicial de silicio.

El corazón de la fabricación de los CI es el procesamiento de las obleas, el rendimiento a partir del cual se mide en la prueba de multisondeo Y_m. Los rendimientos en otras

áreas son bastante predecibles, pero no en la fabricación de obleas. Puede distinguirse dos tipos de defectos en el procesamiento de obleas: 1) defectos de área y 2) defectos puntuales. Los ***defectos de área*** afectan grandes áreas de la oblea, posiblemente toda la superficie. Los originan las variaciones o los niveles incorrectos en los parámetros del proceso. Algunos ejemplos consisten en que las capas que se dopan están demasiado delgadas o demasiado espesas, tienen profundidades de difusión insuficientes en el momento de revestirse y sufren la sobrexposición o subexposición al ataque químico. En general, estos defectos se corrigen mejorando el control de procesos o creando procesos alternativos superiores. Por ejemplo, el doping por implantación de iones ha remplazado de manera amplia la difusión y el ataque químico con plasma seco ha sido sustituido por el ataque químico líquido para obtener un mejor control sobre las dimensiones.

Los ***defectos puntuales*** ocurren en áreas muy específicas sobre la superficie de la oblea y afectan únicamente un número limitado de circuitos integrados o a uno solo en un área en particular. Por lo general, son producidos por las partículas de polvo en la superficie de la oblea o por las mascarillas en la litografía. Los defectos puntuales también incluyen las dislocaciones en la estructura reticular de la celda cristalina (sección 2.3.2). Estos defectos puntuales se distribuyen de algún modo sobre la superficie de la oblea, lo que da por resultado un rendimiento que es una función de la densidad de los defectos, su distribución sobre la superficie y el área procesada de la oblea. Si se supone que los defectos superficiales son poco importantes y los defectos puntuales se consideran uniformes a través de toda el área de la oblea, el rendimiento resultante se modela mediante la ecuación:

$$Y_m = \frac{1}{1 + AD} \qquad (35.15)$$

donde Y_m = el rendimiento de los chips buenos, determinado por el multisondeo; A = el área procesada, cm^2 (in^2); y D = la densidad de los defectos puntuales, defectos/cm^2 (defecto/in^2). Esta ecuación se basa en las estadísticas de ***Bose-Einstein*** [11] y se ha encontrado que es un buen método de predicción para el rendimiento del procesamiento de obleas, especialmente para chips altamente integrados (VLSI y mayores).

El procesamiento de las obleas es la clave del éxito para la fabricación de circuitos integrados. Para que un productor de CI tenga utilidades, debe obtenerse altos niveles de rendimiento durante esta fase de manufactura; esto se consigue utilizando los materiales iniciales más puros posibles, las tecnologías de equipos más recientes, un buen control sobre los procesos individuales, el mantenimiento de las condiciones de salas limpias y procedimientos de prueba e inspecciones eficientes.

REFERENCIAS

[1] Bakoglu, H. B., ***Circuits, Interconnections, and Packaging for VLSI***, Addison-Wesley Longman, Inc., Reading, Mass., 1990.

[2] Edwards, P. R., ***Manufacturing Technology in the Electronics Industry***, Chapman & Hall, Londres, U.K., 1991.

[3] Gise, P. y Blanchard, R., ***Modern Semiconductor Fabrication Technology***, Prentice-Hall. Upper Saddle River, N. J., 1986.

[4] Jackson, K. A. y Schroter. W. (eds.), ***Handbook of Semiconductor Technology***, Vol. 2, ***Processing of Semiconductors***. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2000.

[5] ***Encyclopedia of Chemical Technology***, 4a. ed. John Wiley & Sons. Inc., Nueva York, 2000.

[6] Lee, H. H., ***Fundamentals of Microelectronics Processing***, McGraw-Hill. Nueva York. 1990.

[7] Manzione, L. T., ***Plastic Packaging of Microelectronic Devices***, AT&T Bell Laboratories, publicado por Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1990.

[8] Moreau, W. M., ***Semiconductor Lithography Principles, Practices, and Materials***, Plenum Press, Nueva York, 1988.

[9] National Research Council (NRC), ***Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies***, Commitee on Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies. The National Academies Press, Washington, D.C., 2002.

[10] Pecht, M. (ed.), ***Handbook of Electronic Package Design***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1991.

[11] Price, J. E., "A New Look at Yield of Integrated Circuits". ***Proceedings***, ***IEEE***. Vol. 58, 1970, pp. 1290-1291.

[12] Runyan, W. R. y Bean, K. E., ***Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology***, Addison-Wesley Longman, Inc., Reading, Mass., 1990.

[13] Seraphim, D. P., Lasky. R. y Li, C-Y. (eds.), ***Principles of Electronic Packaging***, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1989.

[14] Sze, S. M. (ed.), ***VLSI Technology***, McGraw-Hill. Nueva York, 1988.

[15] Van Zant, P., ***Microchip Fabrication***, 4a. ed. McGraw-Hill, Nueva York, 2000.

PREGUNTAS DE REPASO

35.1. ¿Qué es un circuito integrado?

35.2. Mencione algunos de los materiales semiconductores importantes.

35.3. Describa el proceso planar.

35.4. ¿Cuáles son las tres etapas principales en la producción de los circuitos integrados basados en silicio?

35.5. ¿Qué es una sala limpia? Explique el sistema de clasificación por medio del cual se califican las salas limpias.

35.6. ¿Cuáles son algunas de las fuentes significativas de contaminantes en el procesamiento de los circuitos integrados?

35.7. ¿Cuál es el nombre del proceso que se utiliza con más frecuencia para obtener la acumulación de lingotes en monocristales de silicio para el procesamiento de semiconductores?

35.8. ¿Cuáles son las alternativas para la fotolitografía en el procesamiento de CI?

35.9. ¿Qué es un material fotorresistente?

35.10. ¿Por qué se prefiere la luz ultravioleta a otra luz visible en la fotolitografía?

35.11. Mencione las tres técnicas de exposición en la fotolitografía.

35.12. ¿Qué material de capas se produce mediante la oxidación térmica en la fabricación de CI?

35.13. Defina la deposición epitaxial.

35.14. ¿Cuáles son algunas de las funciones importantes del diseño en el encapsulado de CI?

35.15. ¿Cuál es la regla de Rent?

35.16. Mencione dos categorías de montaje de componentes para un tablero de circuitos impresos.

35.17. ¿Qué es un DIP?

35.18. ¿Cuál es la diferencia entre el posmoldeado y el premoldeado en el encapsulado plástico de chips de CI?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 16 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

35.1. ¿Cuántos dispositivos electrónicos debe contener un chip de CI para que pueda clasificarse dentro de la categoría VLSI? *a*) 1 000, *b*) 10 000, *c*) 1 millón o *d*) 100 millones.

35.2. ¿Cuál de los siguientes es un nombre alternativo para un chip en el procesamiento de semiconductores? (una mejor respuesta): *a*) componente, *b*) dispositivo, *c*) dado, *d*) encapsulado o *e*) oblea.

35.3. ¿Cuál de los siguientes es una fuente de silicio para el procesamiento de semiconductores?: *a*) silicio puro en la naturaleza, *b*) SiC, *c*) Si_3N_4 o *d*) SiO_2.

35.4. ¿Cuál de las siguientes es la forma más común de radiación que se utiliza en la fotolitografía?: *a*) radiación de un haz electrónico, *b*) luz incandescente, *c*) luz infrarroja, *d*) luz ultravioleta o *e*) rayos X.

35.5. Después de la exposición a la luz, ¿cómo se vuelve una resistencia positiva? *a*) menos soluble o *b*) más soluble al fluido de revelado químico.

35.6. ¿Cuál de los siguientes procesos se utiliza para agregar capas a los diferentes materiales en la fabricación de CI? (tres mejores respuestas): *a*) deposición química de vapor, *b*) difusión, *c*) implantación iónica, *d*) deposición física de vapor, *e*) ataque químico con plasma, *f*) oxidación térmica y *g*) ataque químico húmedo.

35.7. ¿Cuál de los siguientes procesos se utiliza para el dopado en la fabricación de CI? (dos mejores respuestas): *a*) deposición química de vapor, *b*) difusión, *c*) implantación iónica, *d*) deposición física de vapor, *e*) ataque químico con plasma, *f*) oxidación térmica y *g*) ataque químico húmedo.

35.8. ¿Cuál de los siguientes es el metal más común para la intraconexión de dispositivos en un circuito integrado de silicio?: *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) oro, *d*) níquel, *e*) silicio o *f*) plata.

35.9. ¿Cuál proceso de ataque químico produce la fabricación de CI con el ataque químico más anisotrópico?: *a*) ataque químico con plasma o *b*) ataque químico húmedo.

35.10. ¿Cuáles de los siguientes son los dos principales materiales que se utilizan en el encapsulado de CI?: *a*) aluminio, *b*) óxido de aluminio, *c*) cobre, *d*) epóxicos y *e*) dióxido de silicio.

35.11. ¿Cuáles de los siguientes metales se utilizan comúnmente para unir mediante alambres los puntos de contacto de los chips a la estructura de las terminales? (dos mejores respuestas): *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) oro, *d*) níquel, *e*) silicio o *f*) plata.

PROBLEMAS

Procesamiento del silicio y fabricación de CI

35.1. Un boule de un monocristal de silicio crece mediante el proceso de Czochralsky hasta un diámetro promedio de 320 milímetros, con una longitud de 1 500 mm. La semilla y los extremos se eliminan, lo cual reduce la longitud hasta 1 150 mm. El diámetro se conecta a tierra a 300 mm. Se conecta a tierra un área plana de 90 mm de ancho sobre la superficie, la cual se extiende de un extremo a otro. Enseguida se corta el lingote en obleas de un espesor de 0.50 mm, utilizando una navaja abrasiva cuyo espesor es de 0.33 mm. Si se supone que la semilla y los extremos que se cortaron del boule inicial tenían forma cónica, determine: *a*) el volumen original del boule, en mm^3; *b*) ¿cuántas obleas se cortan de él, suponiendo que es posible cortar la longitud total de 1 150 mm?; y *c*) ¿cuál es la proporción volumétrica de silicio en el boule inicial que se desperdició durante el proceso?

35.2. Un boule de silicio crece mediante el proceso Czochralski a un diámetro de 5.25 in y una longitud de 5 ft. Se cortan la semilla y los extremos, reduciendo la longitud efectiva hasta 48.00 in. Se supone que las porciones de la semilla y los extremos tienen forma cónica. El diámetro se conecta a tierra a 4.921 in (125 mm). Una parte plana primaria con un ancho de 1.625 in se conecta a tierra sobre la superficie en toda la longitud del lingote. Después se corta el lingote en obleas de 0.025 in de espesor, utilizando una sierra abrasiva cuyo espesor es de 0.0128 in. Determine *a*) el volumen original del boule, in^3; *b*) ¿cuántas obleas se cortan de él?, suponiendo que es posible cortar la longitud total de 4 ft, y *c*) ¿cuál es la proporción volumétrica del silicio en el boule inicial que se desperdició durante el proceso?

35.3. El área procesable en una oblea de 125 mm de diámetro es un círculo de 120 mm de diámetro. ¿Cuántos chips cuadrados de CI pueden procesarse dentro de esta área, si cada chip tiene 7.5 mm por lado? Suponga que la anchura de las líneas de corte (canales) entre los chips es despreciable.

35.4. Resuelva el problema anterior, pero considere un tamaño de oblea de 200 mm cuya área procesable tenga un diámetro de 195 mm. ¿Cuál es el incremento porcentual en *a*) el diámetro de la oblea, *b*) el área procesable de la oblea y *c*) el número de chips, en comparación con los valores obtenidos en el problema original?

35.5. Una oblea de 4.0 in tiene un área procesable con 3.85 in de diámetro. ¿Cuántos chips cuadrados de CI pueden fabricarse dentro de esta área si cada chip tiene 0.25 in por lado? Suponga que la anchura de las líneas de corte (canales) entre los chips es despreciable.

35.6. Resuelva el problema 35.5, pero ahora utilice un tamaño de oblea de 12.0 in cuya área procesable tenga un diámetro de 11.75 in. ¿Cuál es el incremento porcentual *a*) en el área procesable de la oblea y *b*) en la cantidad de chips, comparados con el incremento de 200% en el diámetro de la oblea?

35.7. Resuelva el problema 35.5, pero ahora utilice un tamaño de chip cuadrado de 0.50 in por lado. ¿Cuántos chips se producen? Compare su respuesta con los resultados del problema 35.5 y escriba sus conclusiones.

35.8. Un boule de silicio se ha procesado mediante esmerilado para obtener un cilindro cuyo diámetro es de 285 mm y cuya longitud es de 900 mm. Enseguida, se rebanará en obleas de 0.7 mm de espesor usando una sierra con un corte de 0.5 mm. Las obleas producidas de este modo se usarán para fabricar tantos chips de CI como sea posible para el mercado de computadoras personales. Cada CI tiene un valor en el mercado para la compañía de $98. Cada chip es cuadrado con 15 mm por lado. El área procesable de cada oblea se define por medio de un diámetro de 270 mm. Estime el valor de todos los chips de CI que pueden producirse, suponiendo un rendimiento global de 80% de producto bueno.

35.9. La superficie de una oblea de silicio se oxida térmicamente, obteniendo como resultado una película de SiO_2 que tiene un espesor de 100 nm. Si el espesor inicial de la oblea era de exactamente 0.400 mm, ¿cuál es el espesor final de la oblea después de la oxidación térmica?

35.10. Se desea hacer un ataque químico en una región de una película de dióxido de silicio sobre la superficie de una oblea de silicio. La película de SiO_2 tiene un espesor de 100 nm. El ancho del área que se va a atacar se especifica para que sea de 650 nm. Si se sabe que el grado de anisotropía del disolvente en el proceso es de 1.25, ¿cuál debe ser el tamaño de la abertura de la mascarilla a través de la que operará el disolvente?

35.11. Respecto al problema 35.10, si se utiliza el ataque químico con plasma en lugar del ataque químico húmedo, y el grado de anisotropía para el ataque químico con plasma es infinito, ¿cuál debe ser el tamaño de la abertura de la mascarilla?

Encapsulado de CI

35.12. Un circuito integrado que se utiliza en un microprocesador contendrá 2 000 compuertas lógicas. Use la regla de Rent con $C = 3.8$ y $m = 0.4$ para determinar la cantidad aproximada de pines de entrada/salida que requiere el encapsulado.

35.13. Un encapsulado dual en línea tiene un total de 48 terminales. Utilice la regla de Rent con $C = 4.5$ y $m = 0.5$ para determinar la cantidad aproximada de compuertas lógicas que podrían fabricarse en el chip del CI para este encapsulado.

35.14. Se pretende determinar el efecto del estilo de encapsulado sobre la cantidad de circuitos (compuertas lógicas) que pueden fabricarse en un chip de CI en la cual se ensambla el encapsulado. Utilizando la regla de Rent con $C = 4.5$ y $m = 0.5$, calcule la cantidad estimada de dispositivos (compuertas lógicas) que podrían colocarse en el chip en los siguientes casos: *a*) un DIP con 16 pines de E/S por lado, es decir, un total de 32 pines; *b*) un portador cuadrado de chips con 16

pines en un lado, es decir, un total de 64 pines de E/S; y c) un arreglo de rejilla con 16 × 16 pines, es decir, un total de 256 pines.

35.15 Un circuito integrado que se usa en un módulo de memoria contiene 2^{24} circuitos de memoria. Dieciséis de estos circuitos integrados se encapsulan en un tablero para proporcionar un módulo de memoria de 256 Mbytes. *a*) Use la regla de Rent, ecuación (35.11), con $C = 6.0$ y $m = 0.12$ para determinar el número aproximado de pines de entrada/salida requeridos en cada uno de los circuitos integrados. *b*) Use la ecuación (35.12) como un cálculo alternativo para el número de pines de E/S.

35.16. En la ecuación de la regla de Rent, con $C = 4.5$ y $m = 0.5$, determine el valor de n_{io} y n_c, en las cuales la cantidad de compuertas lógicas es igual a la cantidad de terminales de E/S en el encapsulado.

35.17. Un dispositivo de memoria estática tendrá un arreglo de dos dimensiones con 64 × 64 celdas. Compare el número de pines de entrada/salida que se requieren utilizando: *a*) la regla de Rent con $C = 6.0$ y $m = 0.12$ y *b*) el cálculo alternativo dado en la ecuación (35.12).

35.18. Para producir un chip de un megabit de memoria, ¿cuántos pines de E/S predice *a*) la regla de Rent ($C = 6.0$ y $m = 0.12$) y *b*) el método de cálculo alternativo dado en la ecuación (35.12)?

35.19. La primera computadora personal IBM se basó en la CPU Intel 8088, que se lanzó en 1979. La 8088 tenía 29 000 transistores y 40 pines de E/S. La versión final de la Pentium III (1 GHz) se lanzó en el año 2000. Contenía 28 000 000 de transistores y tenía 370 pines de E/S. *a*) Determine los valores de los coeficientes m y C de la regla de Rent, suponiendo que el transistor puede considerarse un circuito. *b*) Use el valor de m y C para predecir el número de pines de E/S requeridos por la primera Pentium 4, suponiendo que se fabrica con 42 000 000 de transistores. *c*) La primera Pentium 4, lanzada en 2001, utilizó 423 pines de E/S. Comente la exactitud de su predicción.

35.20. Suponga que se desea producir un dispositivo de memoria que estará dentro de un encapsulado dual en línea con 32 terminales de E/S. ¿Cuántas celdas de memoria puede contener el dispositivo? Según lo estima *a*) la regla de Rent con $C = 6.0$ y $m = 0.12$ y *b*) el cálculo alternativo dado en la ecuación (35.12).

Rendimientos en el procesamiento de CI

35.21. Dados los siguientes datos: rendimiento cristalino de 55%, rendimiento del cristal al ser rebanado de 60%, rendimiento de la oblea de 75%, rendimiento del multisondeo de 65% y rendimiento de la prueba final de 95%. Si el boule inicial pesa 125 kg, ¿cuál es el peso final del silicio representado por los chips después de la prueba final?

35.22. En una línea de producción particular, en una instalación para la fabricación de obleas, el rendimiento del cristal es de 60%, el rendimiento del cristal al ser rebanado es de 60%, el rendimiento de la oblea es de 90%, el rendimiento del multisondeo es de 70% y el rendimiento de la prueba final es de 80%. *a*) ¿Cuál es el rendimiento global para la línea de producción? *b*) Si los rendimientos de la oblea y del multisondeo se combinan en la misma categoría de reporte, ¿cuál sería el rendimiento global esperado de las dos operaciones?

35.23. Una oblea de silicio de 200 mm de diámetro se procesa sobre un área circular con un diámetro de 190 mm. Los chips que se van a fabricar son cuadrados con 10 mm por lado. La densidad de los defectos puntuales en la superficie es de 0.0047 defectos/cm^2. Determine una estimación del número de chips buenos usando el cálculo del rendimiento de Bose-Einstein.

35.24. Una oblea de 12 in se procesa sobre un área circular con un diámetro de 11.75 in. La densidad de los defectos puntuales en la superficie es de 0.018 defectos/in^2. Los chips que se van a fabricar son cuadrados con un área de 0.16 in^2, cada uno. Determine una estimación del número de chips buenos usando el cálculo del rendimiento de Bose-Einstein.

35.25. El rendimiento de chips buenos en el multisondeo para cierto lote de obleas es de 83%. Las obleas tienen un diámetro de 150 mm, con un área procesable de 140 mm de diámetro. Si se supone que los defectos son todos puntuales, determine la densidad de defectos puntuales usando el método de Bose-Einstein para estimar el rendimiento.

35.26. Una oblea de silicio tiene un área procesable de 35.0 in^2. El rendimiento de chips buenos en esta oblea es $Y_m = 75\%$. Si se supone que todos los defectos son puntuales, determine la densidad de defectos puntuales usando el método de Bose-Einstein para estimar el rendimiento.

36 ENSAMBLE Y ENCAPSULADO DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Los circuitos integrados constituyen el corazón de cualquier sistema electrónico, pero el sistema completo consiste en mucho más que los CI encapsulados. Los CI y otros componentes se montan e interconectan en tableros de circuitos impresos, los cuales a su vez se conectan entre sí y se alojan en un chasis o gabinete. El encapsulado de chips (sección 35.6) es sólo una parte del total del encapsulado electrónico. En este capítulo se considerarán los niveles restantes del encapsulado, así como la manera en que se fabrican y ensamblan.

36.1 ENCAPSULADO DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

El encapsulado de dispositivos electrónicos es el medio físico mediante el cual los componentes de un sistema se interconectan eléctricamente y hacen interfaz con los dispositivos externos; esto incluye la estructura mecánica que sostiene y protege al sistema de circuitos.

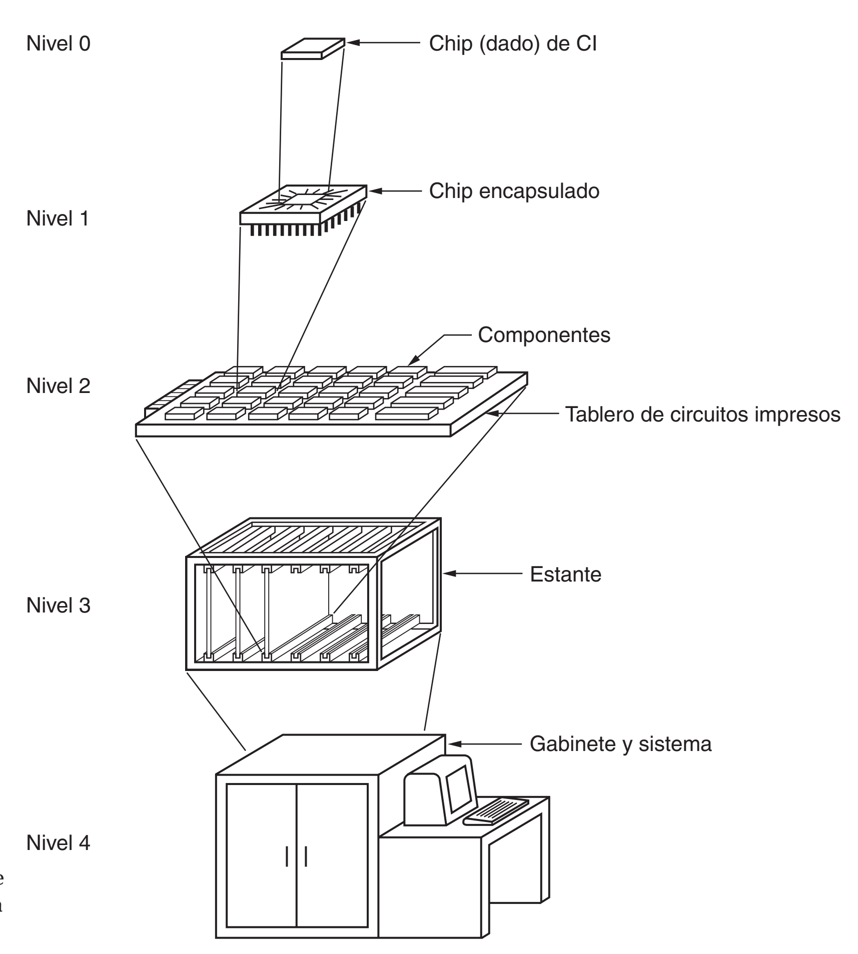


FIGURA 36.1 Jerarquía de encapsulado en un sistema electrónico grande.

Un encapsulado bien diseñado para un dispositivo electrónico tiene las siguientes funciones: 1) distribución de la energía e interconexión de las señales, 2) soporte estructural, 3) protección del circuito contra riesgos físicos y químicos en el ambiente, 4) disipación del calor que generan los circuitos y 5) retrasos mínimos en la transmisión de las señales dentro del sistema.

Para sistemas complejos que contienen muchos componentes e interconexiones, el encapsulado de dispositivos electrónicos se organiza en los niveles que comprenden una ***jerarquía de encapsulado***, la cual se ilustra en la figura 36.1 y se resume en la tabla 36.1. El nivel más bajo es el ***nivel cero***, que se refiere a las interconexiones en el chip semiconductor. El chip encapsulado, que consiste en el CI dentro de un paquete plástico o cerámico conectado a las terminales, constituye el ***primer nivel del encapsulado***.

TABLA 36.1 Jerarquía del encapsulado.

Nivel	Descripción de la interconexión
0	Intraconexiones en el chip
1	Interconexiones del chip al paquete para formar el encapsulado de CI
2	Interconexiones del encapsulado de CI al tablero de circuitos
3	Del tablero de circuitos al estante; encapsulado de tarjeta en el tablero
4	Conexiones de alambrado y cableado en gabinete



FIGURA 36.2 Una serie de ensambles de tableros de circuitos impresos que muestran las tecnologías de inserción y de montaje superficial. (Foto cortesía de Phoenix Technologies, Inc.).

Los chips encapsulados y otros componentes se ensamblan en un tablero de circuitos impresos (PCB, por sus siglas en inglés) utilizando una de dos tecnologías (sección 35.6.1): 1) ***tecnología de inserción*** (PIH, por sus siglas en inglés) o 2) ***tecnología de montaje superficial*** (SMT, por sus siglas en inglés). Los estilos de encapsulado de los chips y las técnicas de ensamble son diferentes para la PIH y para la SMT. En la mayoría de los casos, ambas tecnologías de ensamble se utilizan en el mismo tablero. El ensamble de los tableros de circuitos impresos representa el ***segundo nivel de encapsulado***. En la figura 36.2 se muestra una serie de ensambles de tableros de circuitos impresos de los tipos PIH y SMT.

Los PCB ensamblados se conectan a su vez a un chasis o a otra estructura; éste es el ***tercer nivel de encapsulado***. Este tercer nivel puede consistir en un ***estante*** que contiene los tableros, y usa cables de alambrado para establecer las interconexiones. En sistemas electrónicos grandes, como grandes computadoras, los PCB comúnmente se montan en un tablero de circuitos integrados más grande, llamado ***back plane***, que tiene trayectorias de conducción para permitir la interconexión entre los tableros más pequeños que se unen a él. Esta última configuración se conoce como de ***tarjeta en tablero*** (COB, por sus siglas en inglés); los tableros de circuitos impresos más pequeños se denominan tarjetas y el *back plane* es el tablero.

El ***cuarto nivel de encapsulado*** consiste en la instalación de alambres y cables dentro del gabinete que contiene al sistema electrónico. Para sistemas de complejidad relativamente baja, el encapsulado puede no incluir todos los niveles posibles de la jerarquía.

36.2 TABLEROS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Un tablero de circuitos impresos consiste en una o más capas de material aislante, con líneas delgadas de cobre en una o en ambas superficies, que conectan entre sí los componentes que se fijan al tablero. En tableros que tienen más de una capa, las trayectorias conductoras de cobre se intercalan entre las capas. Los PCB se utilizan en los sistemas electrónicos encapsulados para contener a los componentes y proporcionar conexiones eléctricas entre ellos y los circuitos externos. Se han convertido en las partes estándar fundamentales de casi todos los sistemas electrónicos que contienen los CI encapsulados y otros componentes (nota histórica 36.1). Los PCB son tan importantes y se utilizan con tanta amplitud porque 1) proporcionan una plataforma estructural adecuada para los componentes, 2) es posible producir en forma masiva un tablero con interconexiones adecuadamente direccionadas

de manera consistente, sin la variabilidad que se asocia con la colocación del alambrado a mano, 3) casi todas las conexiones de soldadura suave entre los componentes y el tablero de circuitos impresos se realizan en una operación mecánica de un solo paso, 4) un tablero de circuitos impresos ensamblado proporciona un rendimiento confiable y 5) en los sistemas electrónicos complejos, es posible extraer cada tablero de circuitos impresos para servicio, reparación o remplazo.

Nota histórica 36.1 *Tableros de circuitos impresos.*

Antes de los tableros de circuitos impresos, los componentes eléctricos y electrónicos se sujetaban manualmente a un chasis metálico y después se alambraban y se soldaban a mano para formar el circuito deseado. El metal laminado usual era el aluminio. A finales de la década de 1950, se distribuyeron comercialmente algunos tableros plásticos. Estos tableros, que proporcionaban aislamiento eléctrico, remplazaron gradualmente a los chasises de aluminio. Los primeros plásticos fueron de fenol seguidos de epóxicos reforzados con fibra de vidrio. Los tableros venían con orificios pretaladrados hechos a intervalos estándar en ambas direcciones. Esto inspiró la utilización de componentes electrónicos que fueran compatibles con los espaciamientos entre orificios. El encapsulado dual en línea evolucionó durante este periodo.

Los componentes en estos tableros de circuitos se alambraban a mano; esto se convirtió en una dificultad creciente y aumentó la tendencia a los errores humanos, conforme las densidades de los componentes aumentaban y los circuitos se hacían más complejos. Para solucionar estos problemas con el alambrado manual, se creó el tablero de circuitos impresos, con una capa de cobre tratada con ataque químico en su superficie para formar las interconexiones de cableados.

Las técnicas iniciales para diseñar las mascarillas de los circuitos implicaban un procedimiento de entintado manual, en el cual el diseñador trataba de formar las pistas de conducción y evitar los cortocircuitos en una gran hoja de papel o de papel pergamino. Esto se hizo más difícil conforme el número de componentes en el tablero aumentaba y las líneas conductoras que interconectaban a los componentes se hacían más finas. Se generaron programas de computadora para ayudar al diseñador a solucionar el problema de las trayectorias. Sin embargo, en muchos casos era imposible encontrar una solución sin pistas que no se interceptaran (cortocircuitos). Para resolver el problema se soldaban alambres puente en el tablero con el fin de hacer estas conexiones. Conforme aumentaba la cantidad de alambres puente, apareció nuevamente el error humano. Los tableros de capas múltiples o multicapas se introdujeron para evitar este problema de las trayectorias.

La técnica inicial para la "impresión" del patrón de circuitos en el tablero revestido con cobre fue la serigrafía. Conforme los anchos de las pistas se hacían más finos, se sustituyó la fotolitografía.

36.2.1 Estructuras, tipos y materiales para los PCB

Un ***tablero de circuitos impresos*** (PCB), también denominado ***tablero de alambrado impreso*** (PWB), es un panel plano chapeado con material aislante, diseñado para proporcionar conexiones eléctricas entre los componentes electrónicos que se encuentran en él. Las interconexiones se realizan a través de pistas delgadas conductoras sobre la superficie del tablero o en capas alternas que se intercalan entre las capas del material aislante. Las trayectorias conductoras se hacen de cobre y se denominan ***pistas***. También se encuentran en la superficie del tablero otras áreas de cobre, denominadas ***islas***, para unir y conectar eléctricamente los componentes.

Los materiales aislantes en los PCB son usualmente compuestos de polímeros reforzados con tramas de vidrio o papel. Los polímeros incluyen los epóxicos (los más utilizados), los fenólicos y las poliimidas. El vidrio E es la fibra usual para el reforzamiento del vidrio, especialmente en los PCB epóxicos; el papel es una capa común de reforzamiento para los tableros de fenol. El espesor usual de la capa de sustrato está dentro del rango de 0.8 a 3.2 mm (0.031 a 0.125 in) y el espesor de las capas de cobre mide alrededor de 0.04 mm (0.0015 in). Los materiales que forman la estructura del PCB deben encontrarse aislados eléctricamente, ser fuertes y rígidos, resistentes a las deformaciones, de dimensiones estables, resistentes al calor y deben retardar la flama. Con frecuencia se agregan productos químicos al compuesto de polímeros para obtener las últimas dos características.

Existen tres tipos especiales de tablero de circuitos impresos, como se muestra en la figura 36.3: *a*) tablero de ***un solo lado***, en el cual la capa de cobre se encuentra únicamente

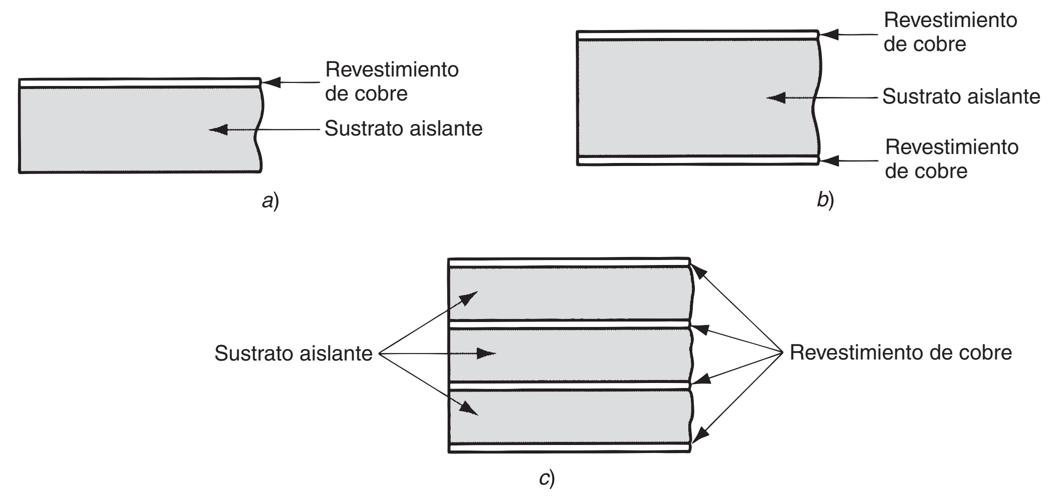


FIGURA 36.3 Tres tipos de estructura de tablero de circuitos impresos: *a*) de un solo lado, *b*) de dos lados y *c*) de multicapas.

en un lado del sustrato aislante; *b*) tablero de ***dos lados***, en el cual el revestimiento de cobre se encuentra en ambos lados del sustrato y *c*) tablero de ***multicapas***, que consiste en capas alternadas de revestimiento conductor y aislante. En las tres estructuras, las capas aislantes se construyen con varias cubiertas de vidrio epóxico (u otro compuesto) adheridas juntas, de modo que formen una estructura fuerte y rígida. Los tableros de multicapas se utilizan para ensambles de circuitos complejos en los cuales debe interconectarse un gran número de componentes con muchas pistas, por lo que se requiere más pistas conductoras de las que se pueden colocar en una o dos capas de cobre. Los tableros de cuatro capas son la configuración de tableros de multicapas más común, pero se producen tableros de hasta 24 capas conductoras.

36.2.2 Producción de los tableros iniciales

Los tableros de un solo lado y de dos lados pueden adquirirse con los proveedores que se especializan en la producción masiva de éstos en tamaños estándares. Después, los tableros pasan a través de un proceso particular con un fabricante de circuitos para crear el patrón de circuito específico y el tamaño de tablero para una aplicación determinada. Los tableros de multicapas se fabrican a partir de tableros estándar de un solo lado y de dos lados. El fabricante del circuito procesa los tableros de manera separada para formar el patrón de circuitos requerido para cada capa de la estructura final, y después los tableros individuales se unen con capas adicionales de material epóxico. El procesamiento para tableros de multicapas requiere más pasos y es más costoso que el de otros tipos de tableros; la razón de utilizarlos es que proporcionan un mejor rendimiento en sistemas grandes que el uso de un gran número de tableros de baja densidad y de una construcción más simple.

El revestimiento de cobre que se utiliza para cubrir los tableros iniciales se produce mediante un proceso continuo de electroformado (sección 29.1.2), en el cual un tambor metálico suave giratorio se sumerge parcialmente en un baño electrolítico que contiene iones de cobre. El tambor es el cátodo del circuito, lo cual provoca que el cobre cubra su superficie. Conforme el tambor gira y sale del baño, el delgado revestimiento de cobre se extrae de su superficie. El proceso es ideal para producir el delgado revestimiento de cobre que necesitan los PCB.

La producción de los tableros iniciales consiste en un método que aplica presión a varias capas de fibra de vidrio entrelazadas e impregnadas con epóxico parcialmente curado (u otro polímero termofijo). El número de hojas que se utilizan en el arreglo inicial determina el espesor del tablero final. Se coloca el revestimiento de cobre en uno u ambos lados de la pila de vidrio epóxico laminado, dependiendo de si se van a producir tableros de un solo lado o de dos lados. En los tableros de un solo lado se utiliza una fina película de protección en un lado, en lugar del revestimiento de cobre, para evitar que el epóxico se pegue en el momento de aplicarle presión. La presión se obtiene entre las dos capas calentadas al vapor de una prensa

hidráulica. La combinación del calor y la presión compacta y cura las capas de vidrio epóxico para unirlas y endurecerlas, formando un tablero de una sola pieza. Después, el tablero se enfría y se lija para remover los excesos de epóxico que hayan escurrido por las orillas.

El tablero completo consiste en un panel de epóxico y un tejido de fibra de vidrio, con revestimiento de cobre sobre su superficie en uno o ambos lados. Ahora está listo para el fabricante de circuitos. Los paneles usualmente se producen con anchuras estándares, diseñados para ser compatibles con los sistemas de manejo de tableros en los equipos de soldado suave en olas, para las máquinas de inserción automáticas y otros elementos para el procesamiento y ensamble de tableros de circuitos impresos. Si el diseño electrónico requiere un tamaño más pequeño, pueden procesarse varias unidades juntas en el mismo tablero para después ser separadas.

36.2.3 Procesos usados en la fabricación de los PCB

El fabricante de circuitos emplea una serie de operaciones de procesamiento para producir un tablero de circuitos impresos terminado, listo para el ensamble de los componentes. Las operaciones incluyen la limpieza, el corte con cizalla, el perforado o taladrado de orificios, el copiado de patrones, el ataque químico y la deposición electrolítica y no electrolítica. La mayoría de estos procesos se ha analizado con anterioridad. En ésta se da énfasis a los detalles de relevancia para la fabricación de PCB. El análisis sigue aproximadamente el orden en el que los procesos se realizan sobre el tablero. Sin embargo, existen diferencias en la secuencia de procesamiento entre distintos tipos de tableros y se examinarán esas diferencias en la sección 36.2.4. Algunas de las operaciones en la fabricación de PCB deben realizarse bajo condiciones de una sala limpia para evitar defectos en los circuitos impresos, especialmente en tableros con detalles y pistas finos.

Preparación del tablero La preparación inicial del tablero consiste en el corte, fabricación de los orificios y otras operaciones de formado para crear rebordes, ranuras y características similares del tablero. Si es necesario, el panel inicial debe cortarse al tamaño adecuado para tener compatibilidad con el equipo del fabricante de circuitos. Las perforaciones, que también se conocen como orificios para herramientas, se hacen mediante taladrado o perforado y se utilizan para posicionar el tablero durante el procesamiento subsecuente. La secuencia de pasos de fabricación requiere un alineamiento muy cercano de un proceso con el otro, y estos orificios se utilizan con pines localizadores en cada operación para obtener un registro exacto. Usualmente son suficientes tres perforaciones para herramientas por tablero; el tamaño de la perforación es aproximadamente de 3.2 mm (0.125 in), más grande que las perforaciones para los circuitos que se harán después.

De manera típica, durante la fase de preparación se aplica al tablero un código de barras para identificarlo. Por último, se utiliza un proceso de limpieza cuyo fin es remover la suciedad y la grasa de la superficie del tablero. Pese a que los requerimientos de limpieza no son tan estrictos como en la fabricación de circuitos integrados, las pequeñas partículas de suciedad o polvo pueden causar defectos en el patrón de circuitos de un tablero de circuitos impresos, y las películas superficiales de grasa pueden inhibir el ataque químico u otros procesos químicos. La limpieza es esencial para la fabricación consistente y confiable de los PCB.

Taladrado de orificios Además de las perforaciones para herramientas, se requieren perforaciones funcionales para los PCB como 1) ***orificios de inserción*** para insertar las terminales de los componentes en los tableros con inserción, 2) ***orificios guía***, las cuales están chapeadas con cobre y se utilizan como trayectorias conductoras que van de un lado a otro del tablero y 3) orificios para asegurar ciertos componentes, como los disipadores de calor y los conectores para el tablero. Estos orificios se taladran o punzonan, utilizando los orificios de herramienta para su ubicación. Mediante el taladrado se producen perforaciones más limpias, pero se obtiene una mayor velocidad de producción mediante el punzonado. El requerimiento de calidad parece dominar la elección, y la mayoría de los orificios en la fabricación de PCB se taladran. En la misma operación puede taladrarse una pila de tres o cuatro paneles, utilizando un taladro de pie controlado numéricamente por computadora (CNC),

el cual recibe instrucciones de programación de la base de datos de diseño. Para trabajos de alta producción, algunas veces se utilizan taladros de ejes múltiples, permitiendo que todas las perforaciones en el tablero se hagan con un solo movimiento de alimentación.

Las perforaciones de los orificios se taladran utilizando brocas espirales estándar (sección 23.3.2), pero la aplicación tiene un número de demandas inusuales sobre la broca y el equipo de taladrado. Posiblemente, el problema más grande sea el pequeño tamaño de los orificios en los tableros de los circuitos impresos; el diámetro del taladro es generalmente menor que 1.27 mm (0.050 in), pero algunos tableros de alta densidad requieren tamaños de orificios de 0.15 mm (0.006 in) o incluso menores [7]. Esas pequeñas brocas de taladro carecen de fuerza y su capacidad para disipar el calor es baja.

Otra dificultad es el material de trabajo único. La broca debe pasar primero por un revestimiento metálico fino y después a través de un compuesto de cristal-epóxico abrasivo. Normalmente se requieren brocas diferentes para estos materiales, pero en el caso del taladrado de tableros de circuitos impresos, una sola broca debe ser suficiente. El pequeño tamaño del orificio, combinado con el apilamiento de varios tableros o el taladrado de tableros de multicapa, da por resultado una alta relación de profundidad a diámetro, y el problema se agrava cuando se extrae el chip del orificio. Otros requerimientos que se aplican a la operación incluyen una alta exactitud en la ubicación de las perforaciones, paredes suaves en los orificios y ausencia de rebaba en éstos. La rebaba usualmente se forma cuando la broca perfora o sale de un orificio; con frecuencia se colocan cubiertas de algún material sobre la superficie y en la parte inferior de la pila de tableros para evitar la formación de rebabas en éstos.

Por último, debe utilizarse cualquier herramienta de corte a cierta velocidad de corte para operar con mayor eficiencia. Para una broca, la velocidad de corte se mide conforme el diámetro. Para brocas muy pequeñas, esto significa velocidades de rotación extremadamente altas, de hasta 100 000 rev/min en algunos casos. Para obtener estas velocidades se requiere de cojinetes de mandril y motores especiales.

Copia de un patrón de circuitos y ataque químico Existen dos métodos básicos por medio de los cuales el patrón del circuito se transfiere a la superficie de cobre en el tablero: la serigrafía y la fotolitografía. Ambos métodos implican el uso de un recubrimiento resistente sobre la superficie del tablero, que determina en qué partes ocurrirá el ataque químico sobre el cobre, para crear las pistas e islas del circuito.

La serigrafía fue el primer método que se utilizó para los tableros de circuitos impresos. De hecho es una técnica de impresión, y es posible que el término de tablero de circuitos impresos se deba a este método. En la ***serigrafía*** (también denominada ***filtrado de pantalla***), se coloca sobre el tablero un esténcil de malla o pantalla que contiene el patrón del circuito y se presiona un líquido resistente a través de la trama de la malla hacia la superficie que se encuentra debajo de ella. El esténcil de malla generalmente se denomina "malla de seda" y data de cuando se utilizaba seda en la impresión comercial para fabricar las mallas; en la actualidad, se utilizan otros materiales que tienen esta misma función e incluyen a los poliésteres y alambres finos de acero inoxidable. Este método es simple y económico, pero su resolución es limitada. Normalmente se utiliza para aplicaciones en las cuales los anchos de las pistas son mayores que 0.25 mm (0.010 in) aproximadamente.

El segundo método para la transferencia del patrón de un circuito es la ***fotolitografía***, en la cual se expone un material resistente sensible a la luz a través de una mascarilla para transferir el patrón del circuito. El procedimiento es muy similar al correspondiente en la fabricación de circuitos integrados (sección 35.3.1); algunos de los detalles para el procesamiento de los PCB se describirán aquí.

La mayoría de los fabricantes utilizan materiales fotorresistentes negativos. Los materiales resistentes están disponibles en dos formas: líquidos o en forma de película seca. Los materiales fotorresistentes líquidos se aplican mediante un rodillo o por aspersión. Las desventajas incluyen la variabilidad en el espesor del recubrimiento y largos periodos de exposición. Es más común que se usen materiales resistentes de película para la fabricación de tableros de circuitos impresos. Constan de tres capas, una película de un polímero fotosensible que se encuentra entre una capa de soporte de poliéster en un lado y una capa plástica

removible en el otro lado. La cubierta evita que el material fotosensible se pegue durante su almacenamiento y su manejo. Aunque son más costosas que las resistencias líquidas, las resistencias de películas secas se aplican en capas de espesor uniforme y su procesamiento en la fotolitografía es más simple. Para aplicarse, la cubierta se remueve y la película de material resistente se coloca sobre la superficie de cobre en la cual se adhiere. Se utilizan rodillos calientes para presionar y suavizar el material resistente contra la superficie.

El alineamiento de las mascarillas con el tablero recae en el uso de las perforaciones de registro en la mascarilla, las cuales se alinean con las perforaciones de las herramientas en el tablero. La impresión por contacto se utiliza para exponer el material resistente debajo de la mascarilla. Después, se revela la resistencia, lo cual implica la eliminación de las regiones no expuestas por el negativo de la resistencia en la superficie. Generalmente se utiliza el revelado químico para materiales resistentes líquidos y en película seca.

Después del revelado de la resistencia, algunas áreas de la superficie de cobre permanecen cubiertas por el material resistente, mientras que otras están sin proteger. Las áreas cubiertas corresponden a las pistas e islas del circuito, mientras que las áreas sin proteger corresponden a las regiones abiertas del circuito. Se utiliza el ***ataque químico*** para remover los revestimientos de cobre en las regiones no protegidas de la superficie del tablero, generalmente por medio de un material de ataque químico (sección 35.4.5). El ataque químico es el paso de la secuencia que transforma la película de cobre sólido en interconexiones de un circuito eléctrico.

El ataque químico se lleva a cabo en una cámara, en la cual se rocía el material de ataque químico sobre la superficie del tablero, que ahora está parcialmente cubierta con el material resistente. Se utilizan varios materiales de ataque químico para remover el cobre, incluidos el persulfato de amonio ($(NH_4)_2S_2O_4$), el hidróxido de amonio (NH_4OH), el cloruro de cobre ($CuCl_2$) y el cloruro férrico ($FeCl_3$). Cada uno tiene ventajas y desventajas. Deben controlarse estrechamente los parámetros del proceso (por ejemplo, la temperatura, la concentración del material de ataque químico y la duración) para evitar una ataque excesivo o débil, como en la fabricación de los CI. Después del ataque químico, el tablero debe enjuagarse y el material resistente que permanece debe desprenderse de la superficie por medios químicos.

Chapeado En los tableros de circuitos impresos, se necesita el chapeado en las superficies de las perforaciones para proporcionar trayectorias de conducción de un lado del tablero al otro, en tableros de dos lados o entre las capas de los tableros de multicapas. En la fabricación de tableros de circuitos impresos se utilizan dos tipos de proceso de chapeado: galvanoplastia (sección 29.1.1) y el chapeado no eléctrico (sección 29.1.3). La galvanoplastia tiene una velocidad de deposición mayor que la deposición no eléctrica, pero requiere que la superficie de revestimiento sea metálica (conductora); la deposición no eléctrica es más lenta, pero no requiere una superficie conductora.

Después de taladrar los orificios guía y los orificios para inserción, las paredes de los orificios consisten en un material aislante de cristal epóxico, el cual no es conductor. De acuerdo con esto, debe utilizarse el chapeado no eléctrico al principio para proporcionar un revestimiento fino de cobre a las paredes de los orificios. Una vez que se aplica una delgada película de cobre, se utiliza el chapeado electrolítico para aumentar el espesor de la película en las superficies de los orificios hasta entre 0.025 y 0.05 mm (0.001 y 0.002 in).

El oro es otro metal que algunas veces se chapea sobre los tableros de circuitos impresos. Se utiliza como un revestimiento muy fino en los conectores de las orillas de un PCB para proporcionar un contacto eléctrico superior. El espesor del revestimiento mide sólo alrededor de 2.5 μm (0.0001 in).

36.2.4 Secuencia en la fabricación de los PCB

En esta sección se describirá la secuencia de procesamiento para varios tipos de tableros. La secuencia tiene que ver con la transformación de un tablero de un polímero reforzado cubierto con cobre en un tablero de circuitos impresos; este procedimiento se denomina ***circuitización***. El resultado deseado, usando un tablero de dos lados como ejemplo, se ilustra en la figura 36.4.

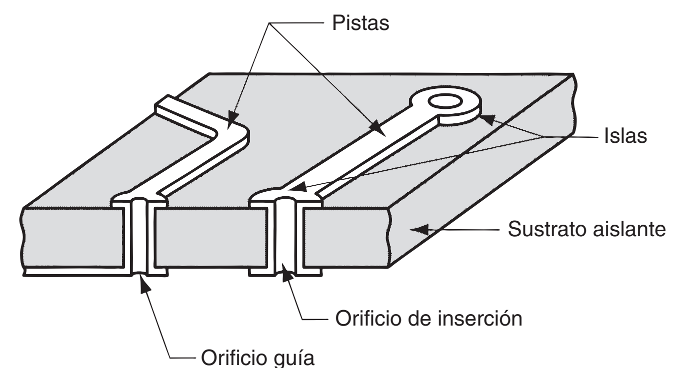


FIGURA 36.4 Una sección de un PCB de dos lados en la que se muestran algunas de las características que se obtienen durante la fabricación: pistas e islas, y orificios guía y de inserción chapeados con cobre.

Circuitización Se utilizan tres métodos de circuitización para determinar qué regiones del tablero se recubrirán con cobre [11]: 1) sustractivo, 2) aditivo y 3) semiaditivo.

En el ***método sustractivo*** se ataca con material químico a las porciones abiertas del revestimiento de cobre en la superficie inicial del tablero, para que permanezcan las pistas e islas del circuito deseado. El proceso se llama "sustractivo" debido a que el cobre se remueve de la superficie del tablero. Los pasos del método sustractivo se describen en la figura 36.5.

El ***método aditivo*** comienza con una superficie de tablero que no está cubierta con cobre, como la superficie no revestida de un tablero de un solo lado. Sin embargo, la superficie no revestida se trata con un químico, denominado ***recubrimiento untado***, el cual actúa como catalizador para la deposición no eléctrica: los pasos de este método se describen en la figura 36.6.

El ***método semiaditivo*** usa una combinación de los pasos para el método aditivo y sustractivo. El tablero inicial tiene una película muy fina de cobre en su superficie, 5 μm (0.0002 in) o menos. El método procede como se describe en la figura 36.7.

Procesamiento de diferentes tipos de tableros Los métodos de procesamiento difieren para cada uno de los tipos de PCB: de un solo lado, de dos lados y de multicapas. Estas diferencias se detallan brevemente en los siguientes párrafos.

Un ***tablero de un solo lado*** comienza su fabricación como una lámina plana que se reviste con material aislante en un lado mediante una película de cobre. Se utiliza el método sustractivo para definir el patrón del circuito en el revestimiento de cobre. A continuación se describe una secuencia de procesamiento común: 1) el tablero se corta al tamaño adecuado, se hacen los orificios para herramientas y se limpia el tablero; 2) se aplica el material fotorresistente a la superficie con el revestimiento de cobre; 3) la superficie se expone a la luz ultravioleta a través de una mascarilla del circuito; 4) se revela la resistencia; ésta expone las áreas abiertas entre las pistas de los circuitos y las islas del cobre; 5) las áreas expuestas se diluyen, dejando las pistas y las islas sobre el tablero; 6) la resistencia restante se desprende y 7) se hace el perforado y el rebarbado de los orificios para las terminales.

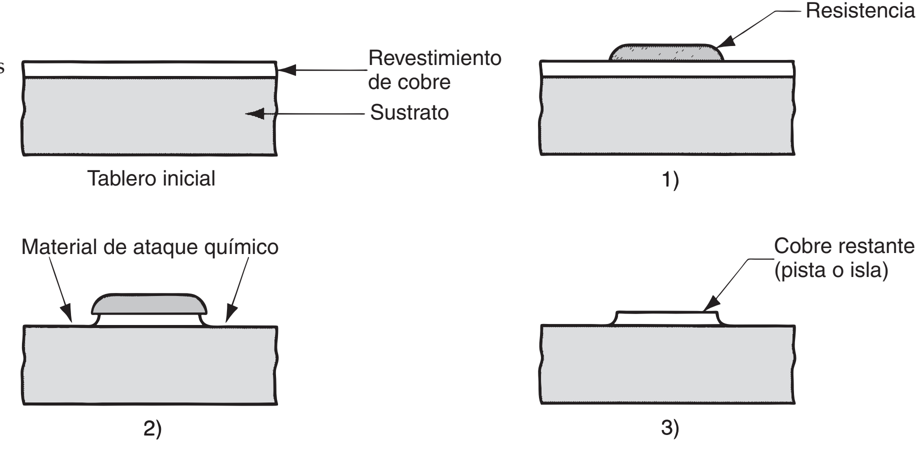


FIGURA 36.5 El método sustractivo de circuitización en la fabricación de tableros de circuitos impresos: 1) aplicación de la resistencia a áreas que no se someten al ataque químico, utilizando la fotolitografía para exponer las áreas que se van a someter al ataque químico, 2) ataque químico y 3) eliminación de la resistencia.

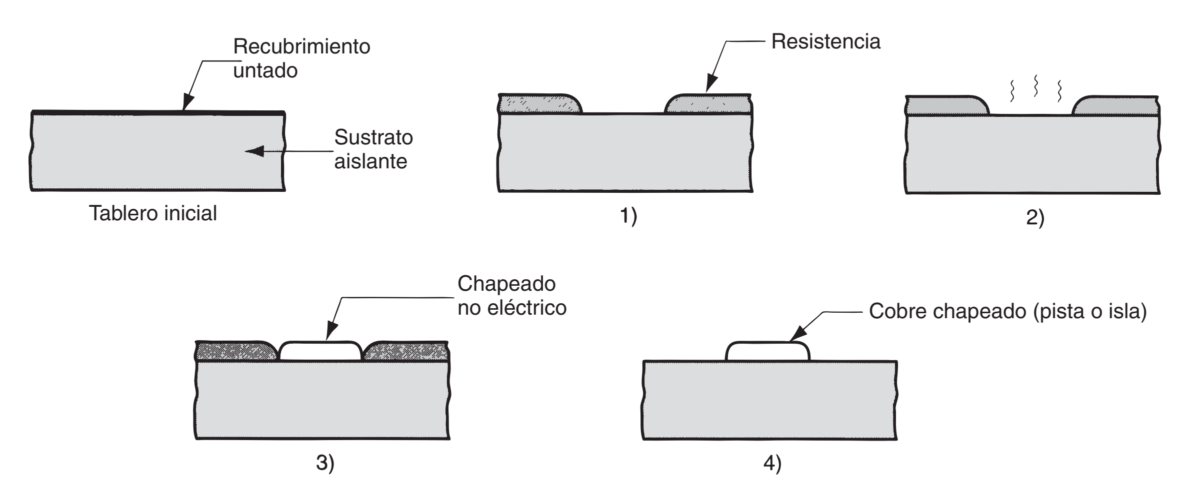
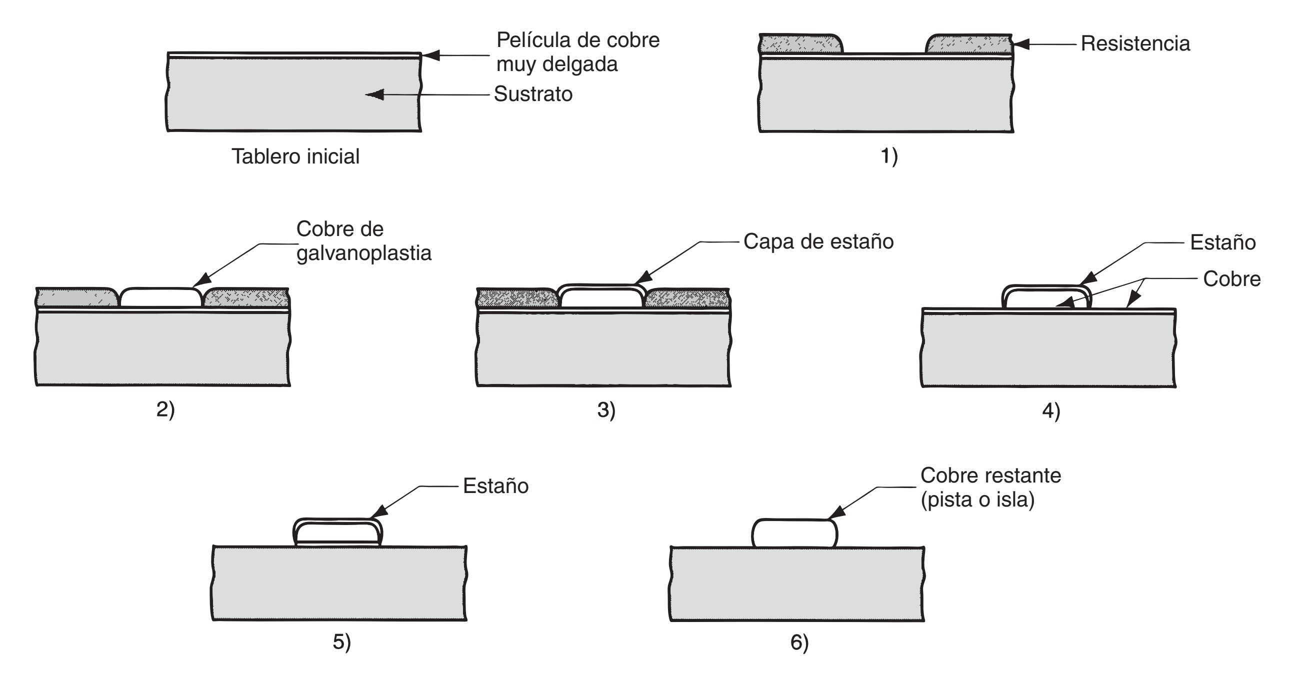


FIGURA 36.6 El método aditivo de circuitización en la fabricación de tableros de circuitos impresos: 1) se aplica a la superficie una película resistente utilizando la fotolitografía para exponer las áreas que se van a chapear con cobre, 2) la superficie expuesta debe activarse químicamente para servir como catalizador para la deposición no eléctrica, 3) chapeado de cobre en las áreas expuestas y 4) desprendimiento de la resistencia.

Un ***tablero de dos lados*** implica una secuencia de procesamiento en cierto modo más compleja debido a que tiene pistas de circuitos en ambos lados que deben conectarse eléctricamente. La interconexión se realiza por medio de orificios guía chapeados con cobre que van de las islas en una superficie del tablero a las islas en la superficie opuesta, como se muestra en la figura 36.4. La siguiente es una secuencia de fabricación típica para un tablero de dos lados; el proceso inicia con un tablero revestido de cobre en ambos lados y utiliza el método semiaditivo así: 1) el tablero se corta al tamaño adecuado, se hacen los orificios para herramientas y se limpia el tablero; 2) se hacen los orificios guía, así como

FIGURA 36.7 El método semiaditivo de circuitización en la fabricación de tableros de circuitos impresos: 1) se aplica la resistencia a las áreas que no se chapearán; 2) galvanoplastia con cobre, utilizando la delgada película de cobre para conducción; 3) aplicación del estaño en la superficie del cobre depositado; 4) eliminación de la resistencia; 5) ataque químico de la película delgada de cobre que queda en la superficie, mientras que el estaño sirve como una resistencia para el cobre de la galvanoplastia; y 6) desprendimiento del estaño del cobre.



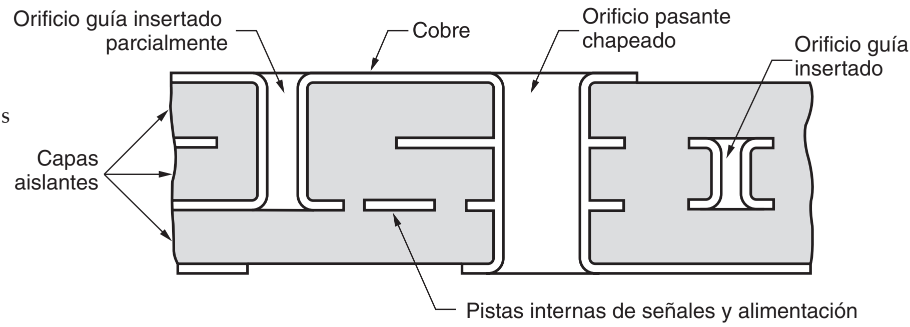


FIGURA 36.8 Sección transversal típica de un tablero de circuitos impresos con multicapas.

los de inserción de los componentes; 3) los orificios se recubren utilizando el método de chapeado no eléctrico seguido del electrochapeado; 4) se aplica la resistencia a las áreas de la superficie en ambos lados que no se recubrirán con cobre; 5) se electrochapea una capa de estaño sobre las áreas expuestas, la cual cubrirá las áreas de cobre que van a convertirse en las pistas, islas y orificios guía en el siguiente paso de ataque químico; 6) se desprende la resistencia para exponer las áreas que no se han chapeado con estaño y 7) se atacan químicamente las regiones de cobre expuestas que no forman parte del circuito.

Un ***tablero de multicapas*** es estructuralmente el más complejo de los tres tipos y esto se refleja en su secuencia de manufactura. La construcción laminada se aprecia en la figura 36.8 y muestra una serie de características de un tablero de circuitos impresos de multicapas. Los pasos de fabricación para las capas individuales son básicamente los mismos que los que se utilizaron para los tableros de un solo lado y de dos lados. Lo que hace que la fabricación de tableros de multicapas sea más complicada es que deben procesarse todas las capas, cada una con su propio diseño de circuito; después las capas se deben unir para formar un tablero único; y por último, el tablero debe pasar por una secuencia de procesamiento. De este modo, se observa que la fabricación de tableros de circuitos impresos de multicapas es un proceso que consiste en tres etapas principales: 1) fabricación de las capas individuales, 2) unión de las capas y 3) procesamiento del tablero de multicapas.

Un tablero de multicapas consta de ***capas lógicas***, que llevan las señales eléctricas entre componentes sobre el tablero, y ***capas de voltaje***, las cuales se utilizan para distribuir la energía. Las capas lógicas generalmente se fabrican a partir de tableros de dos lados, mientras que las capas de voltaje se construyen a partir de tableros de un solo lado. Aunque existen variaciones en las operaciones y en la secuencia, dependiendo del diseño del circuito, los pasos de procesamiento para estos tableros son similares a los que se acaban de describir. En los tableros de multicapas se utilizan sustratos aislantes más delgados que los que se emplean en sus contrapartes de un solo lado y de dos lados, de modo que el tablero final tenga un espesor adecuado.

En la segunda etapa se ensamblan las capas individuales. El procedimiento inicia con un recubrimiento de cobre en la parte inferior y después se agregan las capas individuales, separando una de la otra por medio de una o más capas de vidrio fabric impregnadas con epóxico parcialmente curado. Después de que todas las capas se han intercalado juntas, se coloca un último recubrimiento de cobre sobre la pila para formar la capa del extremo superior. El registro entre las capas es muy importante para obtener las interconexiones adecuadas. Esto se consigue utilizando puntas de ajuste preciso en los orificios para herramientas con el propósito de alinear las capas. Después, las capas se pegan en un solo tablero, calentando el ensamble bajo presión para curar el epóxico. Después del curado, se pule cualquier exceso de resina que se haya derramado a través de los bordes.

Al inicio de la tercera etapa de fabricación, el tablero consiste en multicapas unidas, con un revestimiento de cobre sobre sus superficies extremas. Por lo tanto, su construcción se parece a la de un tablero de dos lados y su procesamiento es semejante. La secuencia consiste en taladrar orificios adicionales y chapear los orificios para establecer las trayectorias de conducción entre las dos películas exteriores de cobre, así como ciertas capas

internas de cobre y el uso de la fotolitografía y del ataque químico para formar el patrón del circuito sobre las superficies exteriores de cobre.

Pruebas y operaciones finales Después de que se ha fabricado un circuito sobre la superficie en un tablero, debe inspeccionarse y probarse que funcione de acuerdo con las especificaciones de diseño y que no contenga defectos de calidad. Dos procedimientos son comunes: 1) inspección visual y 2) prueba de continuidad. En la ***inspección visual,*** el tablero se examina visualmente para detectar circuitos abiertos y cortocircuitos, errores en las ubicaciones de los orificios y otras fallas que puedan observarse sin aplicar energía eléctrica al tablero. Las inspecciones visuales, que se realizan no sólo después de la fabricación sino también en varias etapas críticas durante el proceso de producción, se llevan a cabo mediante el ojo humano o aparatos de visión (sección 44.5.3).

Una ***prueba de continuidad*** implica el uso de sondas de contacto que tocan de manera simultánea las pistas y las áreas de islas sobre la superficie del tablero. La distribución consiste en un arreglo de sondas que mediante una ligera presión se obligan a hacer contacto con puntos específicos sobre la superficie del tablero. Con este procedimiento se verifican las conexiones eléctricas entre los puntos de contacto.

Deben realizarse varios pasos adicionales de procesamiento sobre el tablero con el propósito de prepararlo para el ensamble. La primera de estas operaciones finales es la aplicación de una delgada capa de soldadura sobre las superficies de pistas e islas. Esta capa sirve para proteger al cobre de la oxidación y de la contaminación. Se lleva a cabo mediante galvanoplastia o haciendo que el lado de cobre entre en contacto con los rodillos que se sumergen parcialmente en soldadura derretida.

Una segunda operación implica la aplicación de un revestimiento de resistencia de soldadura a todas las áreas de la superficie del tablero, excepto a las islas, las cuales se soldarán posteriormente durante el ensamble. El revestimiento resistente a la soldadura se formula químicamente para soportar la adhesión de la soldadura; de este modo, en los procesos de soldado subsecuentes (sección 32.2), la soldadura sólo se adhiere a las áreas de las islas; el material resistente a la soldadura se aplica por medio de serigrafía.

Por último, se imprime una leyenda de identificación sobre la superficie, una vez más mediante serigrafía. La leyenda indica en dónde se van a colocar los diferentes componentes sobre el tablero en el ensamble final; en la práctica industrial moderna, también se imprime un código de barras en el tablero para el control de la producción.

36.3 ENSAMBLE DE TABLEROS DE CIRCUITOS IMPRESOS

El ***ensamble de tableros de circuitos impresos*** consiste en componentes electrónicos (por ejemplo, encapsulados de CI, resistencias y capacitores), así como componentes mecánicos (por ejemplo, sujetadores y disipadores de calor) montados sobre un tablero de circuitos impresos. Éste es el nivel 2 en el encapsulado electrónico (tabla 36.1). Como se dijo anteriormente, el ensamble de tableros de PCB se basa en las tecnologías de inserción o de montaje en superficie. Algunos ensambles de PCB incluyen componentes tanto de inserción como de montaje superficial. El análisis de esta sección se refiere exclusivamente a los ensambles de PCB que utilizan componentes de inserción. En la sección 36.4, se considera la tecnología de montaje superficial y algunas combinaciones de los dos tipos.

El alcance del ensamble electrónico incluye ensambles de PCB, así como niveles más altos de encapsulado, como ensambles de múltiples PCB ubicados en un chasis o gabinete, conectados en forma eléctrica y mecánica. En la sección 36.5 se exploran las tecnologías por medio de las cuales se hacen las conexiones eléctricas en los niveles más altos del encapsulado.

En los ensambles de circuitos impresos con componentes de inserción, las terminales deben insertarse en los orificios del tablero de circuitos. Se ha utilizado el término de ***tecnología de inserción*** (PIH, por sus siglas en inglés) para identificar este método de ensamble. Una vez insertadas, las terminales se sueldan en su lugar en los orificios del tablero. En los tableros de dos lados y de multicapas, las superficies de los orificios, dentro de las cuales

se insertan las terminales, generalmente están chapeadas con cobre; de aquí se deriva el nombre de ***chapeado a través del orificio*** (PTH, por sus siglas en inglés) para estos casos. Después del proceso de soldado, los tableros se limpian y prueban, y los que no pasan la prueba se reprocesan si es posible. De este modo es posible dividir el procesamiento para ensamble de PCB con componentes de terminal en los siguientes pasos: 1) inserción de los componentes, 2) soldadura suave, 3) limpieza, 4) prueba y 5) retrabajo. Estos pasos serán la base para el análisis de la tecnología PIH.

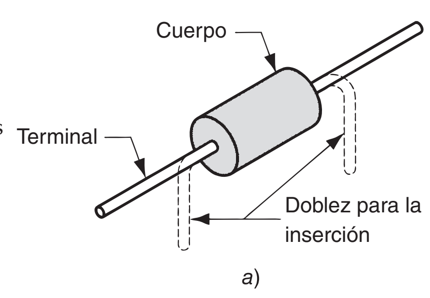
36.3.1 Inserción de componentes

En la inserción de componentes, las terminales de los componentes se insertan en los orificios adecuados del PCB. Un solo tablero puede estar muy densamente poblado con cientos de componentes separados (DIP, resistores y otros), los cuales necesitan insertarse en el tablero. En las plantas modernas de ensamble electrónico, la mayoría de las operaciones de inserción de componentes son realizadas por máquinas automáticas. Una pequeña proporción (quizá de 5 a 10%) se realiza a mano para componentes no estándar que no pueden acomodarse en las máquinas automáticas. Algunas veces se utilizan robots industriales para sustituir la mano de obra humana en tareas de inserción de componentes.

Máquinas de inserción automática Las máquinas de inserción automática son semiautomáticas o completamente automáticas. El tipo semiautomático implica la inserción de los componentes mediante un dispositivo de inserción mecánico, cuya posición en relación con el tablero la controla un operador humano. Las máquinas de inserción completamente automáticas constituyen la categoría preferida, debido a que son más rápidas y su necesidad de atención humana se limita a la carga de componentes y a la eliminación de atascamientos cuando ocurren. Estas máquinas se controlan mediante un programa que por lo general funciona directamente con los datos de diseño del circuito. Los componentes se cargan en estas máquinas en forma de carretes, cargadores u otros dispositivos portadores que mantienen una orientación adecuada de los componentes hasta su inserción.

La operación de inserción implica: 1) el preformado de las terminales, 2) la inserción de las terminales en los orificios del tablero y 3) el corte y la fijación de las terminales en el otro lado del tablero. El preformado sólo es necesario para algunos tipos de componentes e implica el doblado en forma de U de las terminales que inicialmente son rectas, para su inserción. Muchos componentes se fabrican con las terminales en forma adecuada y requieren muy poco o ningún preformado.

La inserción se realiza mediante una cabeza de trabajo diseñada para el tipo de componente. Los componentes insertados por las máquinas automáticas se agrupan en tres categorías básicas: *a*) de terminales axiales, *b*) de terminales radiales y *c*) de encapsulado dual en línea. El encapsulado dual en línea (sección 35.6.1) es un encapsulado muy común para circuitos integrados. Los componentes comunes axiales y radiales se ilustran en la figura 36.9. Los componentes axiales tienen la forma de un cilindro, con las terminales proyectándose desde cada extremo. Los componentes típicos de esta clase incluyen resistores, capacitores y diodos. Sus terminales deben doblarse, como se sugiere en la figura, para poder insertarse. Los componentes radiales tienen terminales paralelas y diversos cuerpos, uno de los cuales se muestra en la figura 36.9b. Este tipo de componente se ejemplifica con los diodos emisores de luz, los potenciómetros, las redes de resistencias y los portafusibles.



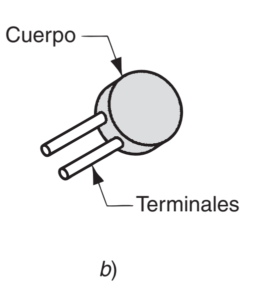


FIGURA 36.9 Dos de los tres tipos de componentes básicos utilizados con las máquinas de inserción automática: a) de terminales axiales y b) de terminales radiales. El tercer tipo, el encapsulado dual en línea (DIP), se ilustra en la figura 34.19.

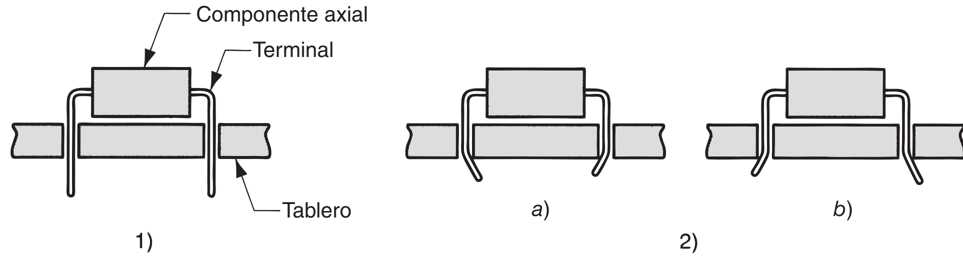


FIGURA 36.10 Sujeción y recorte de las terminales de los componentes: 1) al insertarlas y 2) después del doblez y del corte; las terminales pueden doblarse ya sea a) hacia adentro o b) hacia afuera.

Estas configuraciones son lo suficientemente diferentes para que deban usarse máquinas de inserción separadas con diseños apropiados de cabezas de trabajo para manejar cada categoría. El posicionamiento exacto del tablero bajo la cabeza de trabajo previo a cada inserción se realiza mediante una mesa de posicionamiento *x-y* de alta velocidad. Para una confiabilidad óptima en la operación de inserción, los diámetros de los orificios en el tablero de circuitos impresos deben ser superiores a los diámetros de las terminales de los componentes entre 0.25 y 0.5 mm (0.010 y 0.020 in). Esto no sólo facilita la inserción, sino que también proporciona un espacio adecuado para el flujo de soldadura durante la subsecuente operación de soldado.

Una vez insertadas las terminales a través de los orificios en el tablero, se sujetan y se recortan. La sujeción implica el doblez de las terminales, como se muestra en la figura 36.10, para asegurar mecánicamente el componente con el tablero hasta que se suelde. Si no hay sujeción, el componente corre el riesgo de salirse de los orificios durante el manejo del tablero. En el momento del recorte, las terminales se cortan a la longitud adecuada; de otra manera, existe una posibilidad de que se doblen y causen algún cortocircuito con las pistas de los componentes cercanos. La máquina de inserción realiza estas operaciones de manera automática en la parte inferior del tablero.

Los tres tipos de máquinas de inserción, correspondientes a las tres configuraciones básicas de componentes, pueden unirse para formar una línea de ensamble de tableros de circuitos integrados. La integración se realiza por medio de un sistema de una banda transportadora que transfiere los tableros de un tipo de máquina al siguiente. Se utiliza un sistema de control computarizado para dar seguimiento al progreso de cada tablero conforme se mueve por la celda y para descargar los programas adecuados en cada estación de trabajo. Un problema en el manejo de una línea de ensamble integrada de este tipo es equilibrar las cargas de trabajo entre las estaciones. Algunas estaciones pueden tener asignadas una gran cantidad de inserciones para realizar, lo que ocasiona que las otras estaciones estén desocupadas.

Inserción manual y robótica La inserción manual se usa cuando el componente tiene una configuración no estándar y, por ende, no puede manejarlo una máquina estándar de inserción. Estos casos incluyen interruptores y conectores, así como resistores, capacitores y algunos otros componentes. Aunque la proporción de inserción manual de componentes en la industria es muy baja, su costo es alto debido a que tiene tasas de producción mucho más bajas que las de inserción automática.

La inserción manual generalmente consiste en elementos de trabajo similares a los que se realizan en una máquina de inserción automática. Las terminales del componente deben pasar primero a través de un proceso, para alinearlas adecuadamente con los orificios de inserción. Después, el componente se inserta en el tablero y sus terminales se sujetan y se recortan. En la configuración más simple, el operador utiliza la leyenda impresa en el tablero del circuito para determinar la posición donde cada componente se va a colocar. El error humano puede representar un problema, en especial cuando existen muchos componentes para insertarse, cada uno en una ubicación diferente. Además, el hecho de que los ensambles de tableros frecuentemente se hacen en bajas cantidades significa que el operador no puede aprender por completo la tarea; esto contribuye también a errores. Se han creado diferentes esquemas para reducir los errores. Un diseño de estación de trabajo presenta los componentes al operador en cierto orden, el cual se coordina mediante un haz de luz controlado por computadora que se dirige a la posición del tablero donde el componente debe insertarse.

El uso de robots industriales (sección 38.2) es otro enfoque para la reducción del error humano en el ensamble de los PCB. Dos atributos de un robot hacen que tal aplicación sea factible: 1) los robots pueden programarse para realizar tareas complicadas y 2) pueden equiparse con dispositivos de sujeción para manejar una serie de estilos de componentes. Los robots industriales no pueden utilizarse como sustitutos de las máquinas de inserción automáticas porque son muy lentos. Trabajan a velocidades similares a las del ser humano; su uso se justifica debido a que reducen los costos del trabajo y los errores humanos durante el ensamble.

36.3.2 Soldadura suave

El segundo paso básico en el ensamble de PCB es la soldadura suave. Para los componentes de inserción, las técnicas de soldado suave más importantes son el soldado suave a mano y el soldado suave en olas. Estos métodos, así como otros aspectos de la soldadura suave, se analizan en la sección 32.2.

Soldado suave a mano El soldado suave a mano implica un operador calificado que utilice un cautín para realizar las conexiones de los circuitos. Comparado con el soldado suave en olas, el soldado suave a mano es lento, puesto que las uniones de soldadura se hacen una por una. Como método de producción se utiliza generalmente para lotes pequeños de producción y retrabajo. Como sucede con otras tareas manuales, el error humano puede provocar problemas de calidad. El soldado suave a mano algunas veces se utiliza después del soldado suave en olas para agregar componentes delicados que podrían dañarse en el ambiente hostil de la cámara de soldado suave en olas. Los métodos manuales tienen ciertas ventajas en el ensamble de PCB, que deben señalarse, 1) el calor está localizado y puede dirigirse a una pequeña área objetivo, 2) el equipo no es tan costoso como el del soldado suave por olas y 3) el consumo de energía es considerablemente menor.

Soldado suave en olas El soldado suave en olas es una técnica mecanizada en la cual los tableros de circuitos impresos que contienen los componentes de inserción se mueven a través de una banda transportadora sobre una ola de soldadura suave fundida (figura 32.9). La posición de la banda es tal que sólo la parte interior del tablero, con las terminales de los componentes proyectándose a través de los orificios, está en contacto con la soldadura suave. La combinación de la acción capilar y la fuerza que ejercen las olas hacia arriba originan que el líquido de la soldadura fluya en los espacios abiertos entre las terminales y los orificios para obtener un buen punto de soldadura. La gran ventaja de la soldadura suave por olas es que todos los puntos de soldadura en un tablero se hacen en un solo paso a través del proceso.

36.3.3 Limpieza, prueba y retrabajo

Los pasos finales de procesamiento en el ensamble de PCB son la limpieza, las pruebas y el retrabajo. También se realizan inspecciones visuales en el tablero para detectar defectos obvios.

Limpieza Después del soldado, están presentes contaminantes en el ensamble del circuito impreso. Estas sustancias extrañas incluyen el fundente, aceite y grasa, sales y suciedad, algunos de los cuales pueden causar la degradación química del ensamble o la interferencia de algunas de sus funciones electrónicas. Para remover estos materiales no deseables, debe llevarse a cabo una o más operaciones de limpieza (sección 28.1).

Los métodos tradicionales de limpieza para los ensambles de PCB incluyen la limpieza a mano con los solventes adecuados y la eliminación de grasa con vapor y solventes clorados. El interés en los riesgos ambientales durante los años recientes ha motivado a la búsqueda de solventes basados en agua que sean efectivos para remplazar a los químicos clorados y fluorizados que tradicionalmente se usan en el desengrasado con vapor.

Pruebas La inspección visual se utiliza para detectar los daños de sustratos en el tablero, componentes faltantes o dañados, fallas de soldadura y defectos de calidad semejantes que se aprecian a simple vista. Se están perfeccionando sistemas de visión por máquina en

un número creciente de instalaciones para que estas inspecciones se realicen de manera automática.

Los procedimientos de prueba deben realizarse en el ensamble completo para verificar su funcionalidad. El diseño del tablero debe permitir estas pruebas, al incluir puntos de prueba en el diseño del circuito. Estos puntos son posiciones convenientes en el circuito para que las puntas de sondeo puedan hacer contacto durante las pruebas. Pueden realizarse distintas pruebas. Los componentes individuales en el circuito se prueban estableciendo contacto con las terminales de los componentes, aplicando señales de entrada de prueba y midiendo las señales de salida. Entre los procedimientos más sofisticados están las pruebas de funciones digitales, en la cuales se examinan el circuito entero o los subcircuitos principales, utilizando una secuencia programada de señales de entrada y midiendo las señales correspondientes de salida para simular las condiciones de operación. El equipo para la función de prueba digital es costoso, y se requiere mucho tiempo de ingeniería para diseñar y programar los algoritmos de prueba adecuados.

Otra prueba que se utiliza para los ensambles de tableros de circuitos impresos es la sustitución, en la cual una unidad de producción se conecta a un prototipo del sistema de trabajo y se aplica energía para que realice sus funciones. Si el ensamble funciona en forma satisfactoria, esto significa que pasó la prueba. Después, se desconecta y la siguiente unidad de producción se sustituye en el componente de prueba.

Por último, se realiza una prueba de quemado en algunos tipos de ensambles de tableros de circuitos impresos que puedan estar sujetos a una "mortalidad infantil". Algunos tableros contienen defectos que no se revelan en las pruebas normales de funcionamiento, pero que pueden causar la falla del circuito durante periodos tempranos de servicio. En las pruebas de quemado los ensambles operan con corriente durante cierto periodo de tiempo, como 24 o 72 horas, algunas veces a temperaturas elevadas, como 40 °C (100 °F), para obligar a que estos defectos manifiesten sus fallas durante el periodo de prueba. Los tableros a los que no afecta la mortalidad infantil sobrevivirán la prueba y proporcionarán una vida larga de servicio.

Retrabajo Cuando la inspección y las pruebas indican que uno o más componentes de los tableros tienen fallas o que algunas uniones de soldadura son defectuosas, usualmente tiene sentido tratar de reparar el ensamble, en lugar de descartarlo todo junto con los componentes restantes que se encuentran en buenas condiciones. Este paso de reparación se denomina retrabajo y es una parte integral en las operaciones de las plantas de ensamble electrónico. Los procedimientos de retrabajo comúnmente incluyen el retoque (la reparación de fallas de soldadura), la sustitución de componentes faltantes o defectuosos y la reparación de la película de cobre que se ha levantado del sustrato de la superficie. Estos procedimientos son operaciones manuales que requieren de trabajadores calificados en la utilización de cautines.

36.4 TECNOLOGÍA DE MONTAJE SUPERFICIAL

Un efecto de la creciente complejidad de los sistemas electrónicos ha sido la necesidad de densidades de encapsulado mayores en los ensambles de circuitos impresos. Los ensambles de PCB convencionales que utilizan componentes con terminales insertados en los orificios tienen algunas limitaciones inherentes, en términos de densidad del encapsulado. Estas limitaciones son: 1) los componentes sólo pueden montarse de un lado del tablero y 2) la distancia de centro a centro entre las terminales de estos componentes debe ser de un mínimo de 1.0 mm (0.04 in), pero generalmente es de 2.5 mm (0.10 in).

La ***tecnología de montaje superficial*** (SMT, por sus siglas en inglés) utiliza un método de ensamble en el cual las terminales de los componentes se sueldan a las islas sobre la superficie del tablero, en lugar de insertarse en los orificios pasantes del tablero (nota histórica 36.2). Al eliminar la necesidad de insertar las terminales en los orificios del tablero, se obtienen varias ventajas [6]: 1) se hacen componentes más pequeños, con sus terminales más juntas entre ellas, 2) aumentan las densidades del encapsulado, 3) los componentes

pueden montarse en ambos lados del tablero, 4) se utilizan tableros de circuitos impresos más pequeños para el mismo sistema electrónico, 5) se elimina el taladrado de muchos orificios durante la fabricación del tablero; incluso se requieren los orificios guía para conectar entre sí las diferentes capas, y 6) se reducen efectos eléctricos indeseables, como las capacitancias e inductancias que se generan entre los dispositivos. Las áreas comunes de la superficie del tablero que ocupan los componentes SMT van desde 20% hasta 60% en comparación con los componentes de inserción.

Nota histórica 36.2 *Tecnología de montaje superficial.*

La tecnología de montaje superficial (SMT, por sus siglas en inglés) tiene sus orígenes en los sistemas electrónicos de las industrias aeronáutica, aeroespacial y militar de la década de 1960. Los primeros componentes eran encapsulados cerámicos planos con terminales en forma de ala de gaviota. Los primeros encapsulados eran atractivos, comparados con los de la tecnología de inserción, porque podían colocarse en ambos lados de un tablero de circuitos impresos, duplicando de manera efectiva la densidad de los componentes. Además, el encapsulado SMT podía ser más pequeño que un encapsulado de inserción comparable, aumentando aún más las densidades de componentes en el tablero de circuitos impresos.

A principios de la década de 1970, se hicieron otros avances en la SMT en la forma de componentes sin terminales, componentes con encapsulados cerámicos que no tenían terminales separadas. Esto permitió todavía mayores densidades de circuitos en la electrónica militar y aeroespacial. A finales de esa década, aparecieron los encapsulados SMT de plástico, lo que motivó el uso de la tecnología de montaje superficial de una forma extendida. Las industrias de computación y automotriz se han convertido en usuarios importantes de la SMT, y su demanda por este tipo de componentes ha contribuido a un crecimiento significativo en esta tecnología.

A pesar de estas ventajas, la industria electrónica no ha adoptado totalmente la SMT y excluido la tecnología PIH. Existen varias razones: 1) debido a su menor tamaño, es más difícil para los trabajadores manejar y ensamblar los componentes de montaje superficial; 2) los componentes de SMT son generalmente más caros que los componentes de terminales de inserción, aunque esta desventaja puede cambiar conforme se perfeccionan las técnicas de producción de componentes SMT; 3) la inspección, las pruebas y el reproceso de los ensambles de circuito son generalmente más difíciles para dispositivos SMT, debido a su pequeña escala; y 4) ciertos tipos de componentes todavía no están disponibles en la forma de montaje superficial. Esta última limitación trae como resultado que algunos ensambles electrónicos contengan tanto componentes de montaje superficial como de terminales.

Para la tecnología de montaje superficial de componentes en PCB se requieren los mismos pasos básicos que en la tecnología por inserción. Los componentes deben colocarse en el tablero y soldarse, después limpiarse, hacer las pruebas y el retrabajo. Los métodos para la colocación y el soldado de los componentes, así como algunos de los procedimientos de prueba y retrabajo, son diferentes en la tecnología de montaje superficial. La colocación de los componentes en SMT implica la ubicación correcta del componente en el tablero de circuitos impresos y la adherencia suficiente a la superficie hasta que la soldadura proporcione una conexión eléctrica y mecánica permanente. Existen dos métodos alternativos de colocación y soldado: 1) pegado adhesivo de los componentes y soldado suave en olas y 2) pasta para soldar y soldadura por reflujo. Se ha descubierto que algunos tipos de componentes SMT son más adecuados para un método, mientras que otros lo son para otros.

36.4.1 Pegado adhesivo y soldadura suave en olas

Los pasos de este método se describen en la figura 36.11. Se utilizan algunos adhesivos (sección 32.3) para pegar los componentes a la superficie del tablero. Los más comunes son los epóxicos y los acrílicos. El adhesivo se aplica mediante alguno de los tres métodos siguientes: 1) aplicando el líquido adhesivo con una brocha a través de un esténcil de criba; 2) con una máquina de distribución automática que utiliza un sistema de posicionamiento *x-y* programable o 3) el método de transferencia de pines, en el cual un accesorio que consiste en pines ordenados, de acuerdo con las regiones donde debe aplicarse el adherente,

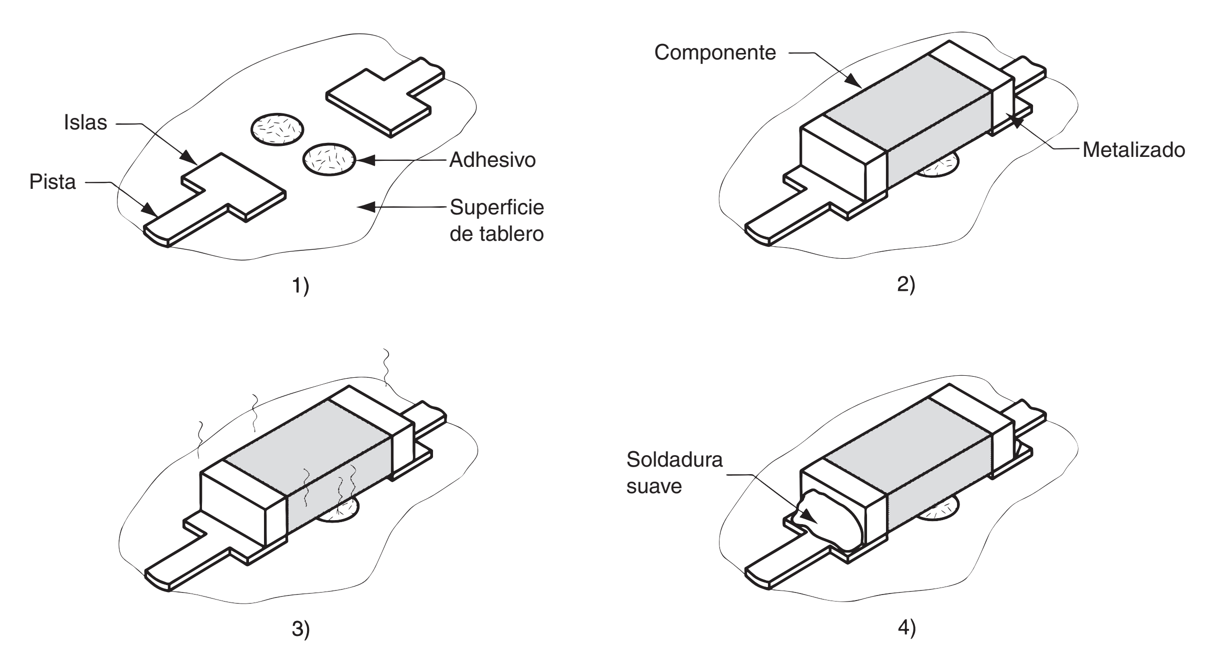


FIGURA 36.11 La unión adhesiva y el soldado suave en olas se muestran aquí para un componente separado de un capacitor o una resistencia: 1) se aplica adhesivo a las áreas sobre el tablero donde se ubicarán los componentes, 2) los componentes se colocan sobre las áreas cubiertas con adhesivo, 3) el adhesivo se cura y 4) las uniones de soldadura se hacen mediante soldado suave en olas.

se hace caer en el líquido adhesivo y después se posiciona en la superficie del tablero para depositar el adhesivo en los puntos requeridos.

Después, las máquinas de colocación automáticas que operan bajo control computarizado colocan los componentes sobre la superficie del tablero. Se utiliza el término de maquinas de ***colocación*** (en inglés **on** sertion) para estas unidades, para distinguirlas de las máquinas de ***inserción*** (en inglés **in** sertion) que se utilizan en la tecnología PIH. Las máquinas de colocación operan a velocidades de hasta cuatro componentes colocados por segundo.

Después de la colocación de los componentes, el adhesivo se cura. Dependiendo del tipo de adhesivo, el curado puede ser por calor, luz ultravioleta (UV) o una combinación de radiación UV e infrarroja (IR). Con los componentes de montaje superficial ahora adheridos a la superficie del PCB, el tablero se somete a un proceso de soldadura suave en olas. La operación difiere de su contraparte en PIH en que los componentes pasan por sí mismos la ola de soldadura fundida. Los problemas técnicos que algunas veces se encuentran en el soldado en olas en SMT incluyen que los componentes se levantan del tablero, se mueven de su posición y que los más grandes crean sombras que inhiben la soldadura adecuada de sus componentes vecinos.

36.4.2 Pasta para soldar y soldadura suave por reflujo

En este método, que parece ser el más común en la industria, se utiliza una pasta de soldar para fijar los componentes a la superficie del tablero de circuitos. La secuencia de pasos se muestra en la figura 36.12.

Una ***pasta para soldar*** es una suspensión de polvos de soldadura en un aglutinante derretido. Tiene tres funciones: 1) es soldadura, típicamente de 80 a 90% del volumen total de la pasta, 2) es el fundente y 3) es el adhesivo que asegura los componentes a la superficie del tablero. Los métodos para aplicar la pasta para soldar a la soldadura del tablero incluyen la serigrafía y la dispersión con jeringa. Las propiedades de la pasta deben ser compatibles con estos métodos de aplicación: la pasta debe fluir, pero no debe ser tan líquida que se pueda expandir más allá del área localizada donde se aplica.

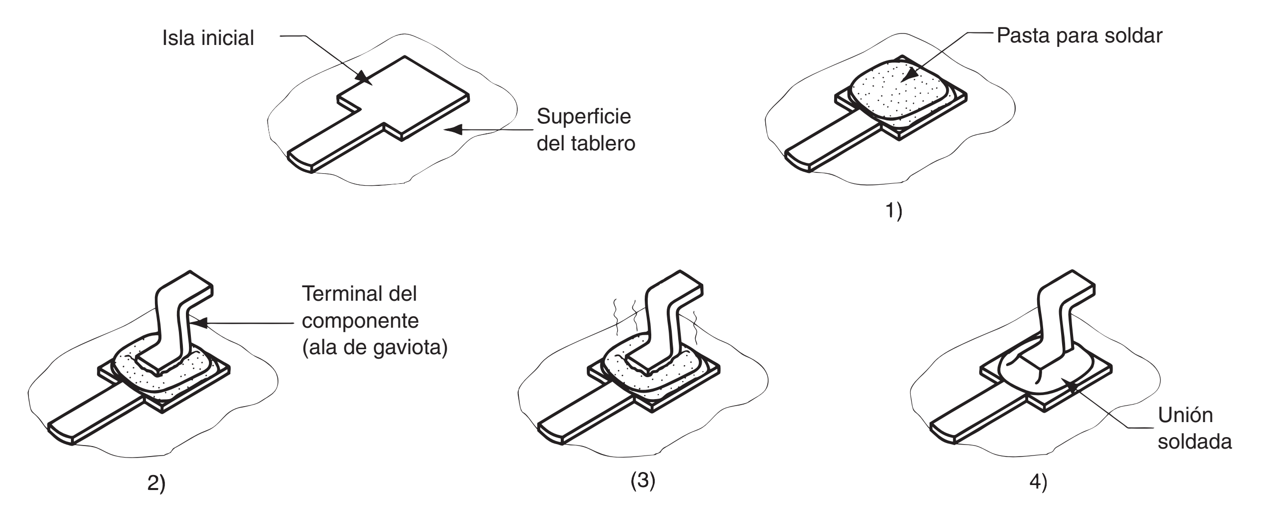


FIGURA 36.12 Método de la pasta para soldar por reflujo: 1) aplicación de la pasta para soldar a las áreas deseadas de las islas, 2) colocación de los componentes sobre el tablero, 3) la pasta se calienta y 4) la soldadura fluye.

Después de la aplicación de la pasta para soldar, los componentes se ubican sobre el tablero mediante el mismo tipo de máquinas de colocación que se utilizan en el método de pegado adhesivo. Para secar la sustancia adherente se lleva a cabo una operación de cocción a baja temperatura; esto reduce el escape de gas durante el soldado. Por último, el proceso de soldadura suave por reflujo (sección 32.2.3) calienta la pasta para soldar suficientemente a fin de que las partículas de soldadura se derritan y formen una unión mecánica y eléctrica de alta calidad, entre las terminales del componente y las islas de circuito sobre el tablero.

Al igual que en la tecnología de inserción, para el ensamblado de los tableros de circuitos impresos en SMT se utilizan líneas de producción integradas para llevar a cabo las diferentes operaciones, como se muestra en la figura 36.13.

36.4.3 Ensambles combinados SMT-PIH

El análisis realizado sobre los dos métodos de ensamble ha supuesto un tablero de circuito más o menos simple exclusivamente con componentes SMT de un solo lado. Estos casos son poco comunes, porque la mayoría de los ensambles de circuitos SMT combinan componentes de inserción y de montaje superficial en el mismo tablero. Además, los ensambles

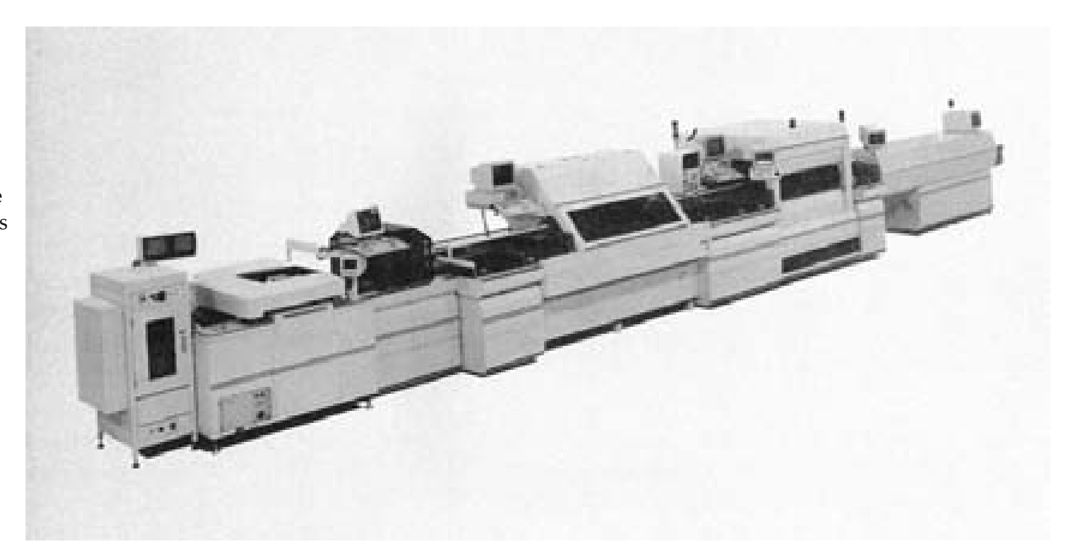


FIGURA 36.13 Una línea de producción de tecnología de montaje superficial (SMT); las estaciones incluyen el lanzamiento del tablero, la impresión por serigrafía de la pasta para soldar, algunas operaciones de ubicación de los componentes y el horno de reflujo de soldadura. (Fotografía cortesía de Universal Instruments Corp.).

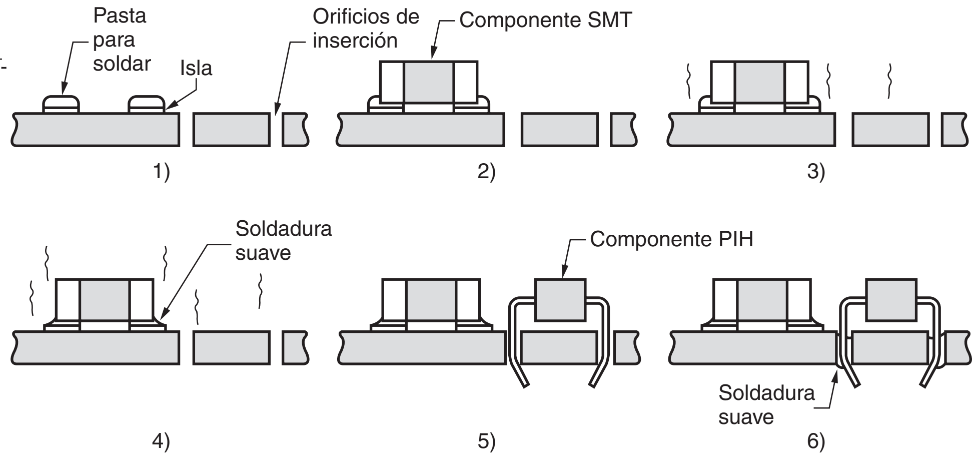


FIGURA 36.14 Secuencia de un proceso típico para ensambles combinados SMT-PIH, con componentes en el mismo lado del tablero: 1) se aplica la pasta para soldar sobre las islas de los componentes SMT, 2) se colocan los componentes SMT en el tablero, 3) calentamiento, 4) soldadura por reflujo, 5) se insertan los componentes PIH; y 6) soldadura en olas de los componentes PIH. Lo anterior estará seguido por la limpieza, las pruebas y el retrabajo.

SMT pueden existir en ambos lados del tablero, mientras que los componentes de inserción normalmente se limitan a un solo lado. La secuencia de ensamble debe alterarse para permitir estas posibilidades adicionales, aunque sean los mismos pasos básicos de procesamiento que se describieron en las dos secciones anteriores.

Una posibilidad es que los componentes SMT y PIH estén en el mismo lado del tablero. Para este caso, una secuencia típica consistiría en los pasos descritos en la figura 36.14. Los ensambles más complejos de PCB consisten en componentes SMT-PIH como en la figura presentada, pero con componentes SMT en ambos lados del tablero.

36.4.4 Limpieza, inspección, pruebas y retrabajo

Después de que los componentes se han conectado al tablero, el ensamble debe limpiarse e inspeccionarse para encontrar las posibles faltas de soldadura; el circuito debe probarse y retrabajarse si es necesario.

La inspección de la calidad del soldado suave es algo más difícil para los circuitos de montaje superficial (SMC, por sus siglas en inglés), debido a que estos ensambles son generalmente de un encapsulado más denso, las uniones de soldadura son más pequeñas y sus formas geométricas son diferentes de las uniones en los ensambles de inserción. El modo en que los componentes se sostienen en su lugar durante el soldado constituye un problema. En el ensamble PIH, los componentes se aseguran mecánicamente en su lugar mediante la fijación de las terminales. En el ensamble SMT, un adhesivo o pasta sostiene los componentes. Pero a las temperaturas de la soldadura, este método de fijación no es tan seguro, porque algunas veces ocurre que los componentes se despegan. Otro problema relacionado con los tamaños cada vez más pequeños en el SMT es una creciente probabilidad de que se formen puentes de soldadura entre dos terminales adyacentes, lo que da por resultado cortocircuitos.

La menor escala también provoca problemas en las pruebas de circuitos SMT, pues hay menos espacio disponible alrededor de cada componente. Las puntas de sondeo de contacto deben ser físicamente más pequeñas y se requieren más puntas debido a que los ensambles de SMT están más densamente poblados. Un modo de enfrentar este problema es diseñar el circuito con islas adicionales, cuyo único propósito sea proporcionar un lugar de contacto para la prueba de sondeo. Desafortunadamente, la inclusión de estas islas de prueba va en contra de la meta para obtener mayores densidades de encapsulado en el tablero.

El retrabajo manual en los ensambles de montaje superficial es más difícil que en los ensambles PIH convencionales, una vez más debido a los tamaños pequeños de los componentes. Se requieren herramientas especiales, como cautines de puntas pequeñas, dispositivos de aumento e instrumentos para la sujeción y manipulación de las piezas pequeñas.

36.5 TECNOLOGÍA DE CONECTORES ELÉCTRICOS

Los ensambles de PCB deben conectarse a los tableros principales y dentro de estantes y gabinetes; estos últimos deben conectarse a otros gabinetes y sistemas por medio de cables. El uso creciente de la electrónica en tantos tipos de productos ha hecho que las conexiones eléctricas sean una tecnología importante. El rendimiento de un sistema electrónico depende de la confiabilidad de las conexiones individuales que enlazan los elementos de un sistema. En esta sección se analiza la tecnología de conectores que se aplica usualmente en el tercer nivel y en niveles más altos del encapsulado electrónico.

Para comenzar, existen dos métodos básicos para hacer conexiones eléctricas: 1) la soldadura suave y 2) las conexiones de presión. El proceso de soldadura suave se analizó en la sección 32.2 y a lo largo de este capítulo. Es la tecnología más utilizada en la electrónica. Las ***conexiones a presión*** son conexiones eléctricas en las cuales se utilizan fuerzas mecánicas para establecer la continuidad eléctrica entre los componentes. Algunas veces denominadas conexiones ***sin soldadura*** se dividen en dos tipos: permanentes y separables. El análisis en esta sección se centrará en estos dos tipos de conexiones a presión.

36.5.1 Conexiones permanentes

Una ***conexión permanente*** implica un contacto de alta presión entre dos superficies metálicas en las cuales una o las dos partes se deforman mecánicamente durante el proceso del ensamble. Los métodos de conexión permanente incluyen la sujeción, la tecnología de ajuste a presión y el desplazamiento de un aislante.

Sujeción de terminales conectoras Este método de conexión se utiliza para ensamblar los alambres a terminales eléctricas. Aunque el ensamble de los alambres con la terminal forma una unión permanente, la terminal en sí misma se diseña para conectarse y desconectarse del componente con el que se une. Existe una diversa variedad de estilos de terminales, algunas de las cuales se muestran en la figura 36.15, y están disponibles en diferentes tamaños. En todas ellas debe hacerse una conexión al alambre conductor y la sujeción es la operación para hacer esto. La ***sujeción*** implica la deformación mecánica del cilindro de la terminal para formar una conexión permanente con el extremo desnudo de un alambre que se inserta en él. La sujeción se realiza mediante herramientas manuales o maquinas para sujetar. Las terminales se proporcionan como piezas individuales o en tiras largas que pueden alimentar a una máquina para sujeción. Si se realiza de una manera adecuada, la unión tendrá una baja resistencia eléctrica y una alta resistencia mecánica.

Tecnología del ajuste a presión La conexión eléctrica de ajuste a presión es similar a la de los ensambles mecánicos, pero las configuraciones de las piezas son diferentes. La tecnología del ajuste a presión se utiliza ampliamente en la industria electrónica para ensamblar las terminales a través de los orificios chapeados en PCB grandes. En ese contexto, un

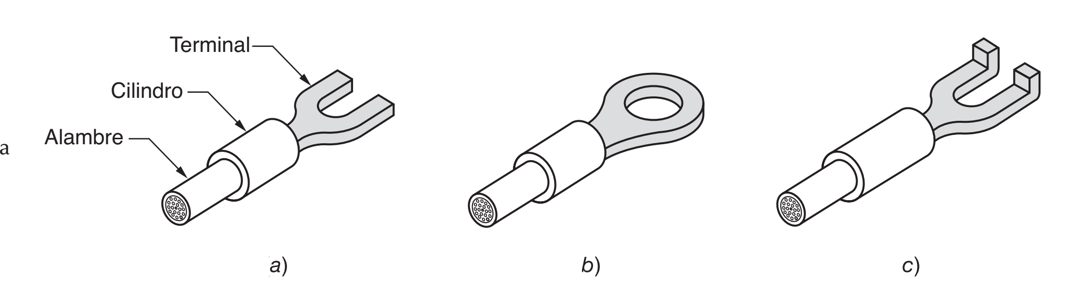


FIGURA 36.15 Algunos estilos de terminales disponibles para hacer conexiones eléctricas separables: a) de lengüeta ranurada, b) de anillo y c) de pestañas.

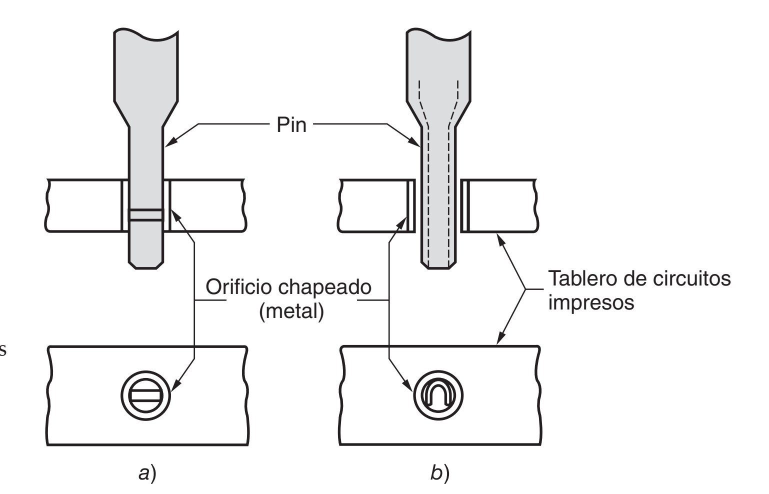


FIGURA 36.16 Dos tipos de pines de terminales electrónicas en la tecnología de ajuste a presión: *a*) sólida y *b*) dúctil.

ajuste a presión implica una parte de interferencia entre el pin de terminal y la perforación chapeada en la cual se inserta. Existen dos categorías de pines de terminales: *a*) sólidos y *b*) dúctiles, como en la figura 36.16. Dentro de estas categorías, los pines de terminales varían entre los fabricantes. El pin sólido tiene una sección transversal rectangular y se diseña de manera que sus esquinas presionen y corten el metal de la perforación chapeada para formar una buena conexión eléctrica. El pin dúctil se diseña como un dispositivo de carga con resorte que se ajusta al contorno de la perforación, pero que presiona contra las paredes de la perforación para obtener el contacto eléctrico.

Desplazamiento de aislante El ***desplazamiento de aislante*** es un método para hacer una conexión eléctrica permanente en el cual un contacto con filos en forma de punta atraviesa el aislante y se desliza contra el conductor de alambre para formar la conexión eléctrica. Este método se ilustra en la figura 36.17 y se utiliza comúnmente para hacer conexiones simultáneas entre contactos múltiples y un cable plano. El cable plano, llamado ***cable de listón***, consiste en una serie de alambres paralelos que se sostienen en un arreglo fijo y a los que rodea un material aislante. Por lo general se terminan con conectores de pines múltiples, los cuales se utilizan ampliamente en la electrónica para hacer conexiones eléctricas entre subensambles mayores. En estas aplicaciones, el método de desplazamiento de aislante reduce los errores de alambrado y aumenta la velocidad del proceso del ensamble. Para hacer el ensamble, el cable se coloca sobre una base y se usa una prensa para dirigir los contactos de los conectores y hacerlos pasar por el aislante hasta que lleguen a los alambres metálicos.

36.5.2 Conectores separables

Los ***conectores separables*** se diseñan para permitir el desensamble y el rensamble; están hechos para conectarse y desconectarse en múltiples ocasiones. Cuando se conectan, deben proporcionar un buen contacto de metal a metal entre los componentes de la unión con una alta confiabilidad y una baja resistencia eléctrica. Los dispositivos de conexiones separables

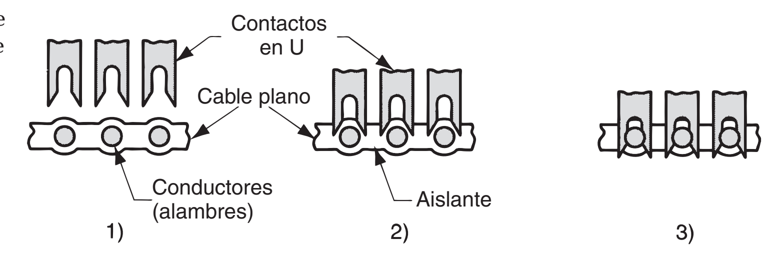


FIGURA 36.17 Método de desplazamiento de aislante para unir un contacto de un conector con un cable plano: 1) posición inicial, 2) los contactos atraviesan el aislante y 3) después de la conexión.

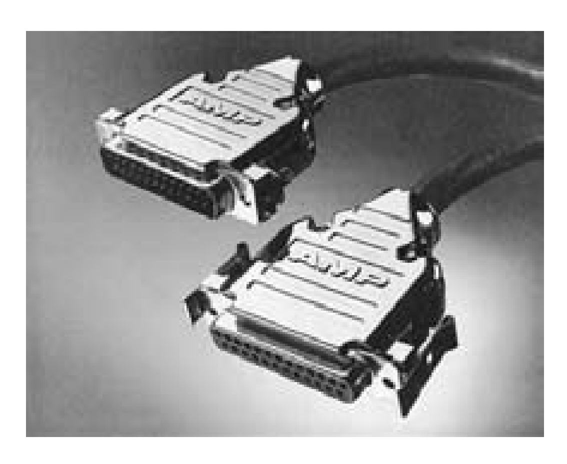


FIGURA 36.18 Conectores con múltiples pines y receptáculo compatible, ambos unidos a cables. (Foto cortesía de AMP, Inc.).

se denominan ***conectores*** y se fabrican en una variedad de estilos para diferentes aplicaciones. Típicamente, los conectores consisten en contactos múltiples, que se encuentran dentro de un receptáculo plástico diseñado para ser compatible con otro conector o con alambres o terminales individuales. Se utilizan para hacer conexiones eléctricas entre varias combinaciones de cables, tableros de circuitos impresos, componentes y alambres individuales.

Existe una amplia selección de conectores disponibles. Entre los aspectos de diseño para elegirlos están: 1) nivel de energía (por ejemplo, si el conector se utiliza para alimentación o la transmisión de señales), 2) costo, 3) número de conductores individuales que el conector implica, 4) tipos de dispositivos y circuitos que se van a conectar, 5) limitaciones de espacio, 6) facilidad de unir el conector con sus terminales, 7) facilidad de conexión con la terminal y el conector correspondiente y 8) frecuencia de conexión y desconexión. Algunos tipos principales de conectores incluyen los conectores de cables, los bloques de terminales, los contactos y los conectores con una fuerza de inserción baja o nula.

Conectores de cable Los ***conectores de cable*** son dispositivos que están conectados permanentemente a cables (en uno o dos extremos) y se diseñan para conectarse y desconectarse de un conector compatible. Un cable conector de energía que se conecta a un contacto de pared es un ejemplo familiar. Otros estilos incluyen el tipo de conector con pines múltiples y el compatible, que se muestran en la figura 36.18, los cuales se utilizan para proporcionar transmisión de señales entre subensambles electrónicos. Otros estilos de conectores con pines múltiples se utilizan para unir tableros de circuitos impresos a otros subensambles en el sistema electrónico.

Bloques de terminales Los ***bloques de terminales*** consisten en una serie de receptáculos espaciados uniformemente que permiten hacer conexiones entre terminales o alambres individuales. Con frecuencia, las terminales o alambres se unen al bloque por medio de tornillos u otros mecanismos mecánicos de sujeción que permitan un desensamble. En la figura 36.19 se ilustra un bloque de terminales.

Contactos En electrónica, un ***contacto*** (o socket), es un dispositivo de conexión que se monta sobre un PCB en el cual pueden insertarse los encapsulados de CI y otros componentes. Los contactos se encuentran permanentemente unidos al PCB por medio de soldadura y/o de presión, pero proporcionan un método de conexión separable para los componentes, los cuales pueden ser conectados, removidos o remplazados de manera conveniente en el ensamble del PCB. Por lo tanto, los contactos son una alternativa a la soldadura en el encapsulado de dispositivos electrónicos.

Conectores con fuerza de inserción baja y nula Las fuerzas de inserción y de retiro pueden ser un problema en la utilización de los conectores de terminales y de contactos en PCB.

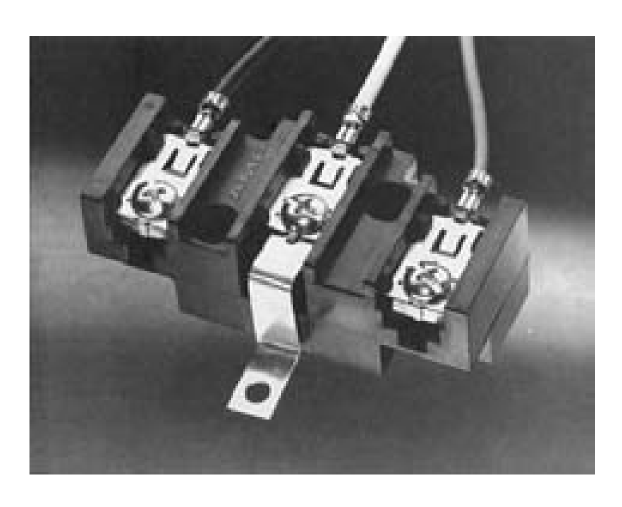


FIGURA 36.19 Bloque de terminales que usa tornillos para conectar las terminales. (Foto cortesía de AMP, Inc.).

Estas fuerzas aumentan en proporción al número de pines involucrados. Es posible que ocurra un daño cuando se ensamblan componentes con muchos contactos. Este problema ha motivado la creación de ***conectores con fuerza de inserción baja*** o ***fuerza de inserción nula*** (LIF y ZIF, respectivamente, por sus siglas en inglés), en los cuales se han establecido mecanismos especiales para reducir o eliminar las fuerzas que se requieren para presionar los conectores positivos y negativos en el momento de su unión o desconexión.

REFERENCIAS

[1] Arabian, J., ***Computer Integrated Electronics Manufacturing and Testing***, Marcel Dekker, Nueva York, 1989.

[2] Bakoglu, H. B., ***Circuits, Interconnections, and Packaging for VLSI***, Addison-Wesley, Reading Mass., 1990.

[3] Bilotta, A. J., ***Connections in Electronic Assemblies***, Marcel Dekker, Nueva York, 1985.

[4] Capillo, C., ***Surface Mount Technology***, McGraw-Hill, Nueva York, 1990.

[5] Coombs, C. F. Jr., (ed.), ***Printed Circuits Handbook***, 4a. ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1995.

[6] Edwards, P. R., ***Manufacturing Technology in the Electronics Industry***, Chapman & Hall, Londres, U.K., 1991.

[7] Kear, F. W., ***Printed Circuit Assembly Technology***, Marcel Dekker, Nueva York, 1987.

[8] Lambert, L. P., ***Soldering for Electronic Assemblies***, Marcel Dekker, Nueva York, 1988.

[9] Marks, L., ***Printed Circuit Assembly Design***, McGraw-Hill, Nueva York, 2000.

[10] Prasad, R. P., ***Surface Mount Technology***, 2a. ed., Kluwer Academic, Boston, 1999.

[11] Seraphim, D. P., Lasky, R. y Li, C-Y. (eds.), ***Principles of Electronic Packaging***, McGraw-Hill, Nueva York, 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

36.1. ¿Cuáles son las funciones de un encapsulado electrónico bien diseñado?

36.2. Identifique los niveles de jerarquía del encapsulado en la electrónica.

36.3. ¿Cuál es la diferencia entre una pista y una isla en un tablero de circuitos impresos?

36.4. Defina un tablero de circuitos impresos (PCB).

36.5. Mencione los tres tipos principales de tableros de circuitos impresos.

36.6. ¿Qué es un orificio guía en un tablero de circuitos impresos?

36.7. ¿Cuáles son los dos métodos básicos de recubrimiento con resistencia para los tableros de circuitos impresos?

36.8. ¿Para qué se utiliza el ataque químico en la fabricación de PCB?

36.9. ¿Qué es la prueba de continuidad y cuándo se realiza en la secuencia de fabricación de PCB?

36.10. ¿Cuáles son las dos categorías principales de ensambles de tableros de circuitos impresos, de acuerdo con el método de unión de los componentes en el tablero?

36.11. ¿Cuáles son algunas de las razones y los defectos que hacen que el retrabajo sea un paso integral en la secuencia de fabricación de PCB?

36.12. Identifique algunas de las ventajas de la tecnología de montaje superficial sobre la tecnología de inserción convencional.

36.13. Identifique algunas de las restricciones y desventajas de la tecnología de montaje superficial.
36.14. ¿Cuáles son los dos métodos de colocación de componentes y de soldado suave en la tecnología de montaje superficial?
36.15. ¿Qué es una pasta para soldadura?
36.16. Identifique los dos métodos básicos para hacer conexiones eléctricas.
36.17. Defina la sujeción en el contexto de las conexiones eléctricas.
36.18. ¿Qué es la tecnología de ajuste a presión en las conexiones eléctricas?
36.19. ¿Qué es un bloque terminal?
36.20. ¿Qué es un conector de pin?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 14 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

36.1. ¿A cuál de los siguientes se refiere el segundo nivel de encapsulado?: *a*) Del componente al tablero de circuitos impresos, *b*) del chip del CI al encapsulado, *c*) las intraconexiones en el chip de CI o *d*) las conexiones de alambrado y cableado.
36.2. ¿Dentro de cuál de los siguientes niveles de encapsulado se incluye la tecnología de montaje superficial?: *a*) cero, *b*) primero, *c*) segundo, *d*) tercero o *e*) cuarto.
36.3. ¿A cuál de los siguientes niveles en la jerarquía de encapsulado electrónico se refiere el encapsulado de tarjeta en tablero (COB)?: *a*) cero, *b*) primero, *c*) segundo, *d*) tercero o *e*) cuarto.
36.4. ¿Cuál de los siguientes materiales poliméricos se utiliza comúnmente como ingrediente para la capa de aislamiento de un tablero de circuitos impresos? (dos respuestas correctas): *a*) cobre, *b*) E-vidrio, *c*) epóxico, *d*) fenólico, *e*) polietileno y *f*) polipropileno.
36.5. ¿Cuál de los siguientes es el espesor típico de una capa de cobre en un tablero de circuitos impresos?: *a*) 0.100 in, *b*) 0.010 in, *c*) 0.001 in o *d*) 0.0001 in.
36.6. La fotolitografía se utiliza ampliamente en la fabricación de PCB. ¿Cuál de los siguientes es el tipo de resistencia que se usa con más frecuencia en el procesamiento de PCB?: *a*) resistencias negativas o *b*) resistencias positivas.
36.7. ¿Cuál de los siguientes procesos de chapeado tiene la más alta velocidad de chapeado en la fabricación de PCB?: *a*) chapeado no eléctrico o *b*) galvanoplastia.
36.8. Además del cobre, ¿cuál de los siguientes es otro material común que se chapea en un PCB?: *a*) aluminio, *b*) oro, *c*) níquel o *d*) estaño.
36.9. ¿Cuáles de los siguientes procesos de soldado suave se utilizan para unir componentes a los tableros de circuitos impresos en la tecnología de inserción? (dos mejores respuestas): *a*) soldadura suave manual, *b*) soldadura suave infrarroja, *c*) soldadura suave por reflujo, *d*) soldadura suave con soplete y *e*) soldadura suave en olas.
36.10. En general, ¿cuál de las siguientes tecnologías produce mayores problemas durante el retrabajo?: *a*) tecnología de montaje superficial o *b*) tecnología de inserción.
36.11. ¿Cuáles de los siguientes métodos para formar conexiones eléctricas producen una conexión separable? (dos respuestas correctas): *a*) sujeción de terminales, *b*) ajuste a presión, *c*) soldadura suave, *d*) bloques de terminales y *e*) contactos.

37 TECNOLOGÍAS DE MICROFABRICACIÓN

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Una tendencia importante en el diseño ingenieril y la manufactura es el aumento en el número de productos y en los componentes de productos cuyos tamaños se miden en micras ($1\ \mu m = 1 \times 10^{-3}$ mm $= 1 \times 10^{-6}$ m). Se han aplicado varios términos a estos artículos en miniatura. El término ***sistemas microelectromecánicos*** (MEMS, por sus siglas en inglés) enfatiza la miniaturización de sistemas que consisten en componentes tanto electrónicos como mecánicos. Algunas veces se usa la palabra ***micromáquinas*** para referirse a estos sistemas. Un término más general es ***tecnología de microsistemas*** (MST, por sus siglas en inglés) que hace referencia a los productos (no necesariamente limitado a los artículos electromecánicos) así como a las tecnologías de fabricación usadas para producirlos. Un término relacionado es ***nanotecnología***, que se refiere a dispositivos semejantes cuyas dimensiones se miden en nanómetros ($1\ nm = 1 \times 10^{-3}\ \mu m = 1 \times 10^{-9}$ m). En la figura 37.1 se indican los tamaños relativos y otros factores asociados con estos términos. En este capítulo se analizarán las técnicas de microfabricación y en el siguiente las de nanofabricación.

37.1 PRODUCTOS DE MICROSISTEMAS

El diseño de productos que son más pequeños y que están constituidos con componentes y subensambles más pequeños significa el uso de menos material, requerimientos de energía más bajos, mayor funcionalidad por unidad de espacio y accesibilidad a regiones que están vedadas para productos más grandes. En la mayoría de los casos, los productos más pequeños pueden significar precios más bajos, debido a que se utiliza menos material; sin embargo, el precio de un producto dado está influido por los costos de investigación, desarrollo y producción, y por cómo pueden distribuirse estos costos en el número de unidades vendidas.

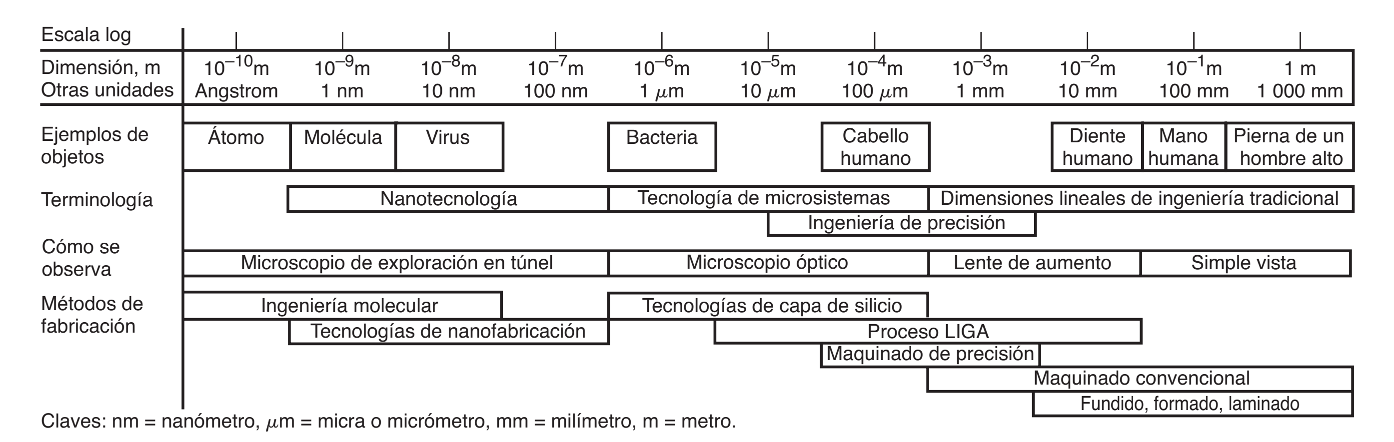


FIGURA 37.1 Terminología y tamaños correspondientes para los microsistemas y tecnologías relacionadas.

Las economías de escala que dan por resultado productos de menor precio aún no se logran por completo en la tecnología de microsistemas, con excepción de un número limitado de casos que se examinarán en esta sección.

37.1.1 Tipos de dispositivos de microsistema

Los productos de microsistema pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de dispositivo (por ejemplo, sensor, actuador) o por el área de aplicación (médica, automotriz, etcétera). Los tipos de dispositivo pueden clasificarse de la manera siguiente [4]:

- ***Microsensores***. Un sensor es un dispositivo que detecta o mide algún fenómeno físico, como el calor o la presión. Incluye un transductor que convierte una forma de variable física en otra forma (por ejemplo, un dispositivo piezoeléctrico convierte la fuerza mecánica en corriente eléctrica); además incluye el empaque físico y las conexiones externas. La mayoría de los microsensores se fabrican con un sustrato de silicio usando las mismas tecnologías de procesamiento que se utilizan para los circuitos integrados (capítulo 35). Los sensores de tamaño microscópico se han creado para medir fuerza, presión, posición, velocidad, aceleración, temperatura, flujo y diferentes variables ópticas, químicas, ambientales y biológicas. El término ***microsensor híbrido*** se usa con frecuencia cuando el elemento sensor (transductor) se combina con componentes electrónicos en el mismo dispositivo. En la figura 37.2 se muestra un micrógrafo de un microacelerómetro inventado en Motorola Co.
- ***Microactuadores.*** Al igual que un sensor, un actuador convierte una variable física de un tipo en otro, pero por lo general la variable convertida involucra alguna acción mecánica (por ejemplo, un dispositivo piezoeléctrico que oscila en respuesta a un campo eléctrico alterno). Un actuador causa un cambio en la posición o la aplicación de la fuerza. Los ejemplos de microactuadores incluyen válvulas, posicionadores, interruptores, bombas y motores rotativos y lineales [4].
- ***Microestructuras y microcomponentes.*** Estos términos se usan para denotar una parte con un tamaño microscópico que no es un sensor ni un actuador. Los ejemplos de microestructuras y microcomponentes incluyen engranes, lentes, espejos, boquillas y haces microscópicos. Estos artículos deben combinarse con otros componentes (microscópicos o de otro tipo) con el fin de proporcionar una función útil. En la figura 37.3 se muestra un engrane microscópico al lado de un cabello humano con propósitos de comparación.
- ***Microsistemas y microinstrumentos.*** Estos términos denotan la integración de varios de los componentes anteriores con el empaque para electrónicos adecuado en un sistema o instrumento miniatura. Los microsistemas y microinstrumentos tienden a ser

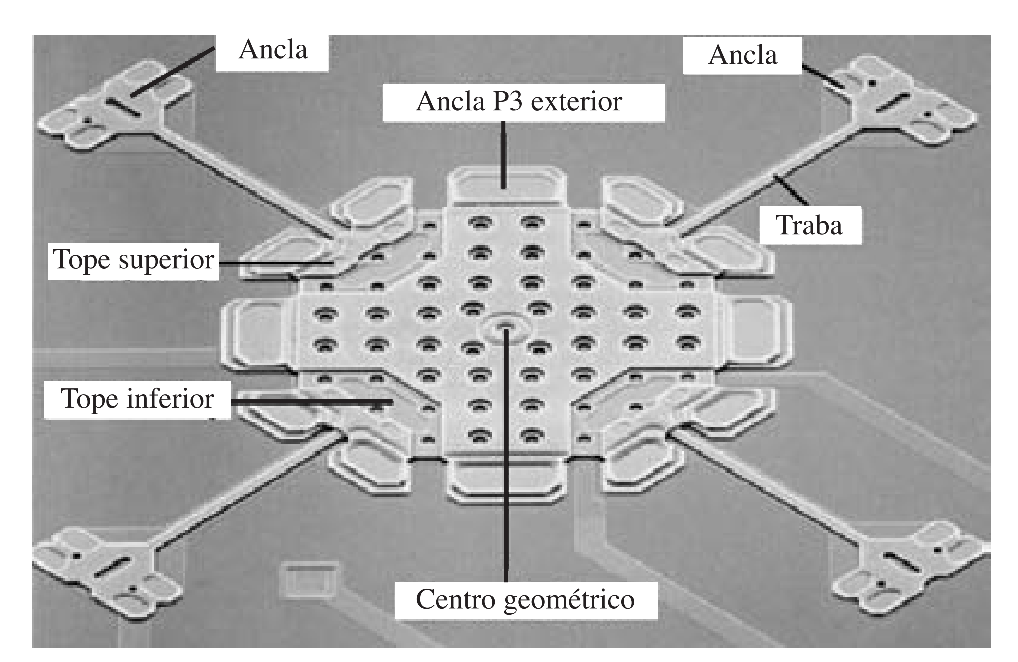


FIGURA 37.2 Micrógrafo de un microacelerómetro. (Foto cortesía de A. A. Tseng, Arizona State University [6]).

muy específicos para determinada aplicación; por ejemplo, microláseres, analizadores químicos ópticos y microespectrómetros. Por el aspecto económico de estos tipos de sistemas ha tendido a hacer difícil su comercialización.

37.1.2 Aplicaciones industriales

Los microdispositivos y sistemas anteriores se han aplicado en una amplia variedad de campos. Existen muchas áreas problemáticas que pueden abordarse de mejor manera usando dispositivos muy pequeños. Algunos ejemplos importantes son los siguientes:

Cabezas de impresión por inyección de tinta En la actualidad, ésta es una de las aplicaciones más importantes de las MST, porque una impresora de inyección de tinta común utiliza varios cartuchos cada año. La operación de la cabeza de impresión por inyección de tinta se muestra en la figura 37.4. Un arreglo de elementos calentadores de la resistencia

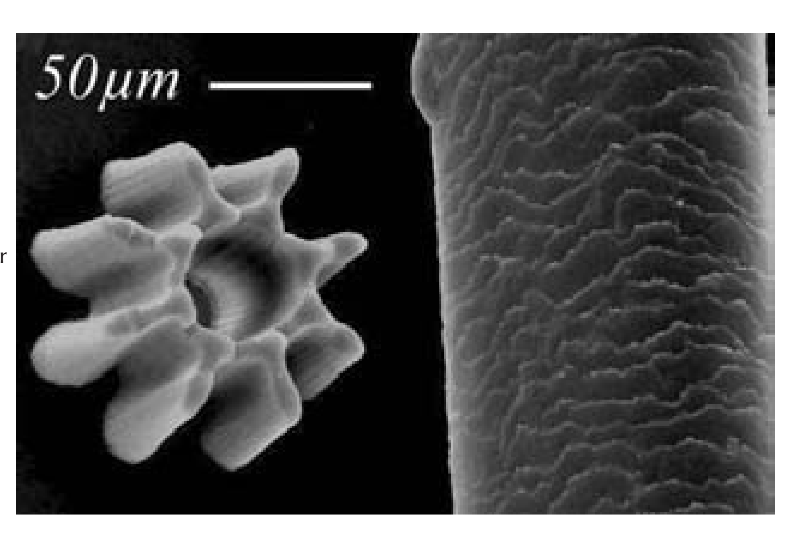


FIGURA 37.3 Un engrane microscópico y un cabello humano. La imagen se realizó usando un microscopio electrónico de exploración. El engrane es de polietileno de alta densidad moldeado mediante un proceso similar al proceso LIGA (sección 37.3.3) excepto porque la cavidad del molde se fabricó usando un haz de iones enfocado. (Foto cortesía de W. Hung, Texas A&M University, y M. Ali, Nanyang Technological University).

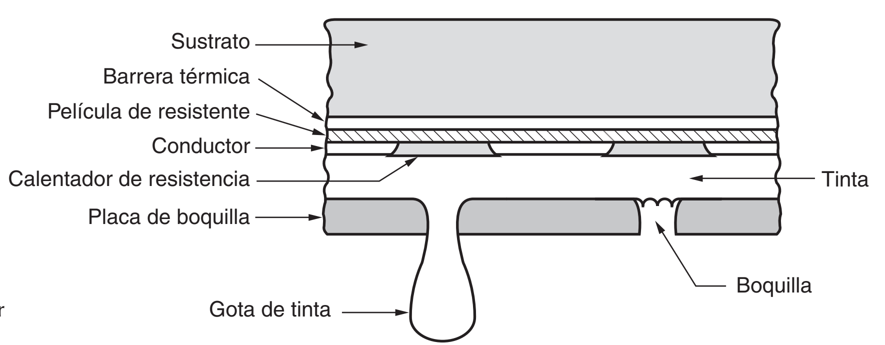


FIGURA 37.4 Diagrama de una cabeza de impresión por inyección de tinta.

se localiza por encima de un arreglo correspondiente de boquillas. La tinta fluye entre los calentadores y boquillas. Cada resistor puede activarse de manera independiente bajo el control del microprocesador en microsegundos. Cuando se activa, la tinta líquida que se encuentra inmediatamente debajo del calentador hierve de manera instantánea, brotando a través de la abertura de la boquilla y golpeando el papel, donde se seca de forma casi inmediata para formar un punto que es parte de un caracter alfanumérico u otra imagen. Las impresoras de inyección de tinta actuales poseen resoluciones de 1 200 puntos por pulgada (dpi), lo cual corresponde a una separación de boquilla de sólo 21 μm, que de hecho está en el rango de los microsistemas.

Cabezas magnéticas de película delgada Las cabezas de lectura-escritura son componentes clave en los dispositivos de almacenamiento magnético. Estas cabezas se fabricaban anteriormente con magnetos de herradura que se bobinaban en forma manual con alambres de cobre aislado. Debido a que los medios magnéticos de lectura y escritura con densidades de bits más altas están limitados por el tamaño de la cabeza de lectura-escritura, los magnetos de herradura bobinados a mano eran una limitación en la tendencia tecnológica hacia densidades de almacenamiento mayores. La creación de cabezas magnéticas de película delgada en IBM Corporation fue un momento importante en la tecnología de almacenamiento digital, así como una historia de éxito significativa para las tecnologías de microfabricación. Cada año se producen cientos de millones de cabezas de lectura-escritura de película delgada, atendiendo un mercado de varios miles de millones de dólares al año.

En la figura 37.5 se presenta un esquema simplificado de la cabeza de lectura-escritura, donde se muestran sus partes de MST. Las bobinas de cobre conductor se fabrican mediante la galvanoplastia del cobre a través de un molde de resistente. La sección transversal de la bobina tiene aproximadamente entre 2 y 3 μm por lado. La cobertura de película delgada, con un espesor de sólo unos cuantos μm, está hecho de una aleación de níquel y hierro. El tamaño miniatura de la cabeza ha permitido el crecimiento significativo en las

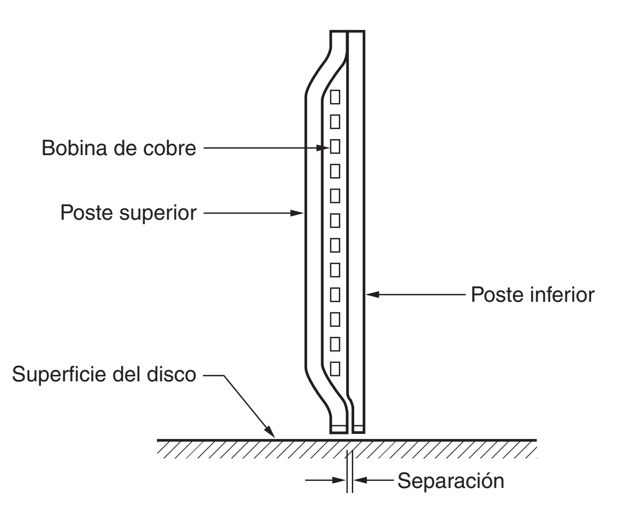


FIGURA 37.5 Cabeza de lectura-escritura magnética de película delgada (esquema simplificado).

densidades de bit de los medios de almacenamiento magnético. Los tamaños pequeños son posibles gracias a las tecnologías de microfabricación.

Discos compactos Los discos compactos (CD) y los discos versátiles digitales (DVD)[1] son productos comerciales importantes en la actualidad como medios de almacenamiento para audio, video, juegos y software de computadoras y aplicaciones de datos. Un CD se moldea con policarbonato (sección 8.2), el cual tiene las propiedades ópticas y mecánicas ideales para la aplicación. El disco tiene 120 mm de diámetro y 1.2 mm de espesor. Los datos consisten en pequeños agujeros (depresiones) en una pista helicoidal que comienza con un diámetro de 46 mm y termina con uno alrededor de 117 mm. Las pistas en la espiral están separadas por alrededor de 1.6 μm. Cada agujero en la pista tiene un ancho aproximado de 0.5 μm y su longitud está entre 0.8 μm y 3.5 μm. De hecho, estas dimensiones califican a los CD como tecnología de microsistemas. Las dimensiones correspondientes de los DVD son aún más pequeñas, lo que permite capacidades de almacenamiento de datos mucho más altas.

Como productos para el consumidor, los CD de música se producen en masa mediante el moldeado por inyección plástica (capítulo 13). Para hacer el molde, se crea un modelo a partir de una capa delgada de material fotorresistente depositada sobre una placa de cristal de 300 mm de diámetro. Un haz láser modulado escribe los datos sobre el material fotorresistente mediante la exposición de regiones microscópicas sobre la superficie conforme la placa se gira y se desplaza en forma lenta y precisa para crear la pista en espiral. Cuando se revela el material fotorresistente, las regiones expuestas se retiran. Estas regiones en el modelo (master) corresponderán a los agujeros en el CD. Después se deposita una capa delgada de níquel sobre la superficie del modelo mediante bombardeo de partículas atómicas (sección 29.3.2). Enseguida se usa el electroformado (sección 29.1.2) para construir el espesor del níquel (hasta varios mm); así se crea una impresión negativa del modelo. A esto se le llama el "padre". Se hacen varias impresiones del padre mediante el mismo proceso de electroformado, creando en efecto una impresión negativa del padre, cuya geometría superficial es idéntica a la del modelo original de placa de cristal. Estas impresiones se denominan "madres". Finalmente, las madres se usan para crear las impresiones de molde reales (llamadas "estampadores"), de nuevo por electroformado, y éstas se usan para producir en masa los CD.[2] La secuencia del proceso es similar para los DVD pero más complicada debido a que la escala es más pequeña y a que los requerimientos de formato de los datos son diferentes.

Una vez moldeado, el lado con agujeros del disco de policarbonato se recubre con aluminio mediante bombardeo con partículas atómicas para crear una superficie con apariencia de espejo. Para proteger esta capa, se deposita un recubrimiento delgado de polímero (por ejemplo, acrílico) sobre el metal. Así el disco compacto final es un sándwich con un sustrato relativamente grueso de policarbonato en un lado y una capa delgada de polímero en el otro, y en medio una capa muy delgada de aluminio. En la operación subsecuente, el haz láser de un reproductor de CD (u otro lector de datos) se dirige hacia el sustrato de policarbonato sobre la superficie reflejante, y el haz reflejado se interpreta como una secuencia de dígitos binarios.

Productos automotrices Los microsensores y otros microdispositivos se usan ampliamente en los productos automotrices modernos. El uso de estos microsistemas es consistente con la creciente aplicación de aplicaciones electrónicas en el tablero para realizar funciones de control y seguridad del vehículo. Las funciones incluyen el control electrónico del motor, el control de curso, los sistemas antibloqueantes de los frenos, el despliegue de

---

[1]El DVD originalmente se conoció como disco de video digital debido a sus aplicaciones primordiales para videos de película. Sin embargo, en la actualidad se utilizan DVD de diferentes formatos para almacenar datos y otras aplicaciones computacionales, juegos y audio de alta calidad.

[2]La secuencia de fabricación de moldes es tan complicada debido a que las superficies con agujeros de las impresiones se degradan después de múltiples usos. Un padre puede usarse para hacer de tres a seis madres y cada madre puede emplearse para hacer de tres a seis estampadores, antes de que sus respectivas superficies se degraden. Un estampador (molde) puede utilizarse para producir sólo unos cuantos miles de discos, de modo que si la corrida de producción es para varios cientos de miles de CD, debe usarse más de un estampador durante la corrida para producir sólo CD de alta calidad.

TABLA 37.1 Microsensores instalados en un automóvil moderno.

Microdispositivo	Aplicación(es)
Acelerómetro	Liberación de bolsa de aire
Sensor de velocidad angular	Sistemas de navegación inteligente
Sensores de niveles	Sensor de los niveles de aceite y gasolina
Sensores de presión	Optimización del consumo de combustible, control de la presión del aceite, presiones de los fluidos de los sistemas hidráulicos (por ejemplo, los sistemas de suspensión), presión del soporte de los asientos, control del clima, presión de los neumáticos.
Sensores de proximidad y distancia	Control de las distancias desde las defensas delantera y trasera para evitar choques y ayudar durante el estacionamiento.
Sensores de temperatura	Control del clima en la cabina.

Recopilado de [4] y [7].

bolsas de aire, el control de la transmisión automática, la dirección de la energía, el control automático de la estabilidad, sistemas de navegación a bordo y activación y desactivación de seguros a control remoto, sin mencionar el acondicionamiento del aire y el radio. Estos sistemas de control y características de seguridad requieren sensores y actuadores, y un número creciente de éstos son de tamaño microscópico. En la actualidad, hay de 20 a 100 sensores instalados en un automóvil moderno, dependiendo del tipo y el modelo. En 1970 prácticamente no había sensores en el tablero, en la tabla 37.1 se enlistan algunos microsensores específicos.

Medicina Las oportunidades para utilizar tecnología de microsistemas en esta área son enormes. De hecho, ya se han hecho avances significativos y muchos de los métodos médicos y quirúrgicos tradicionales han sido transformados por la MST. Una de las fuerzas conductoras detrás del uso de los dispositivos microscópicos es el principio de la terapia de mínima invasión, que implica el uso de incisiones muy pequeñas o incluso de orificios corporales disponibles para tener acceso al problema médico que desea atacarse. Las ventajas de este enfoque sobre el uso de incisiones quirúrgicas relativamente grandes incluyen menor incomodidad del paciente, recuperación rápida, menor cantidad de cicatrices, cicatrices más pequeñas, estancias más cortas en el hospital y reducción de costos por seguros médicos.

Entre las técnicas basadas en la miniaturización de la instrumentación médica está el campo de la endoscopia,[3] que ahora se utiliza de manera rutinaria en los diagnósticos y de manera creciente en cirugía. En la actualidad, una práctica médica estándar consiste en emplear los exámenes endoscópicos acompañados con cirugía laparascópica para tratar hernias y retirar órganos como la vesícula biliar y el apéndice. Se espera el crecimiento de procedimientos similares en la cirugía de cerebro, operando a través de uno o más pequeños orificios taladrados a través del cráneo.

Entre las aplicaciones actuales y futuras de la MST en el campo médico están: 1) angioplastia, en la que los vasos sanguíneos y arterias dañados se reparan usando cirugía láser o globos inflables miniaturizados en el extremo de un catéter que se inserta en la vena; 2) telemicrocirugía, en donde una operación quirúrgica se realiza a control remoto usando un microscopio estéreo y herramientas quirúrgicas microscópicas; 3) prótesis artificiales, como marcapasos para el corazón y aparatos auditivos; 4) sistemas de sensores implantables para monitorear variables físicas en el cuerpo humano, como la presión sanguínea y la temperatura; 5) dispositivos para la administración de medicinas que pueden ser tragados por un paciente y después activados a control remoto en la ubicación exacta determinada por el tratamiento, por ejemplo en el intestino, y 6) ojos artificiales.

Química y ambiente Un papel principal de la tecnología de microsistemas en las aplicaciones químicas y ambientales es el análisis de sustancias, con el fin de medir las cantidades de productos químicos o detectar contaminantes dañinos. Se ha creado una variedad de microsensores químicos. Son capaces de analizar muestras muy pequeñas de la sustancia

[3]El uso de un instrumento pequeño (por ejemplo, un endoscopio) para examinar de manera visual el interior de un órgano corporal hueco como el recto o el colon.

de interés. Algunas veces se integran microbombas en estos sistemas, de modo que puedan enviarse las cantidades adecuadas de la sustancia hacia el componente del sensor.

Otras aplicaciones Existen muchas otras aplicaciones de la tecnología de microsistemas además de las descritas anteriormente. En seguida se listan algunos ejemplos:

- ***Microscopio de sonda exploratoria***. Ésta es una de las tecnologías más nuevas para medir datos microscópicos en las superficies, lo que permite examinar las estructuras superficiales en nanómetros. Para funcionar en este rango dimensional, los instrumentos requieren sondas que sólo tienen unos cuantos μm de longitud y que exploran la superficie a una distancia medida en nm. Estas sondas se producen usando técnicas de microfabricación.[4]
- ***Biotecnología***. En biotecnología, los especímenes de interés frecuentemente tienen tamaños microscópicos. Para estudiar estos especímenes, se necesitan manipuladores y otras herramientas que están en la misma escala de tamaño. Se están creando microdispositivos para sostener, mover, seleccionar, disecar e inyectar las pequeñas muestras de biomateriales bajo un microscopio.
- ***Electrónica.*** Las tecnologías de tableros de circuitos impresos (PCB) y conectores se analizaron en el capítulo 36, pero también deben citarse aquí en el contexto de la MST. La tendencia a la miniaturización en electrónica ha llevado a la fabricación de PCB, contactos y conectores con detalles físicos más pequeños y complejos, y con estructuras mecánicas más consistentes con los microdispositivos estudiados en este capítulo que con los circuitos integrados que se analizaron en el capítulo 35.

37.2 PROCESOS DE MICROFABRICACIÓN

Muchos de los productos en la tecnología de microsistemas están basados en silicio, y la mayoría de las técnicas de procesamiento usadas en la fabricación de microsistemas se toman de la industria de la microelectrónica. Existen varias razones importantes por las que el silicio es un material recomendable en la MST: 1) a menudo, los microdispositivos en la MST incluyen circuitos electrónicos, de manera que tanto el circuito como el microdispositivo puedan fabricarse en combinación sobre el mismo sustrato; 2) además de sus propiedades electrónicas deseables, el silicio también posee propiedades mecánicas útiles, como resistente y elasticidad altas, buena dureza y una densidad relativamente baja;[5] 3) las tecnologías para procesar el silicio están bien establecidas, debido a su amplio uso en la microelectrónica; y 4) el uso de monocristales de silicio permite la producción de características físicas a tolerancias muy estrechas.

Con frecuencia, la tecnología de microsistemas requiere silicio para fabricarse junto con otros materiales para obtener un microdispositivo particular. Por ejemplo, los microactuadores casi siempre consisten de varios componentes hechos con materiales diferentes. En consecuencia, las técnicas de microfabricación consisten en más que sólo el procesamiento de silicio. El estudio de los procesos de microfabricación se organiza aquí en tres secciones: 1) procesos con capas de silicio, 2) el proceso LIGA y 3) otros procesos realizados a escala microscópica.

37.2.1 Procesos con capas de silicio

La primera aplicación del silicio en la tecnología de microsistemas fue en la fabricación de sensores piezorresistivos de silicio para la medición del esfuerzo y la deformación a principios de la década de 1960 [7]. En la actualidad, el silicio se usa ampliamente en la MST para producir sensores, actuadores y otros microdispositivos. Las tecnologías de procesamiento básico son aquellas que se utilizan para producir circuitos integrados (capítulo 35). Sin embargo, debe observarse que existen ciertas diferencias entre el procesamiento de los CI y la fabricación de los microdispositivos que se estudian en este capítulo: 1) Las

[4]Los microscopios de sonda exploratoria se analizan en la sección 38.1.2.
[5]El silicio se analiza en la sección 7.5.2.

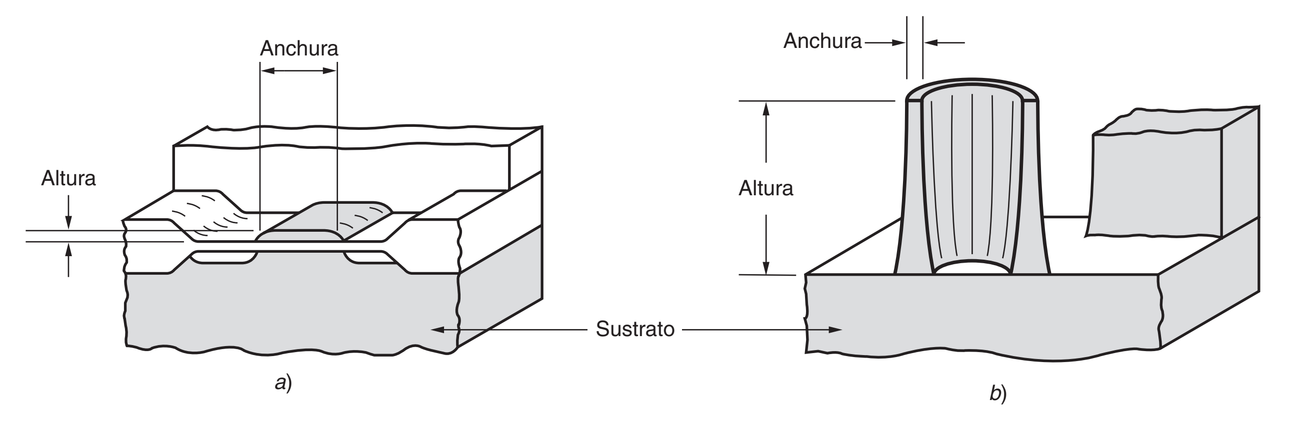


Figura 37.6 Proporciones dimensionales (relación de altura sobre anchura) típica en *a*) la fabricación de circuitos integrados y *b*) componentes microfabricados.

proporciones dimensionales en la microfabricación son generalmente mucho mayores que en la fabricación de CI. La ***proporción dimensional*** se define como la relación de altura sobre anchura de los elementos producidos, como se ilustra en la figura 37.6. Las proporciones dimensionales típicas en el procesamiento de semiconductores son de alrededor de 1.0 o menores, mientras que en la microfabricación la relación correspondiente puede ser hasta de 400 [7]. 2) Los tamaños de los dispositivos hechos en la microfabricación frecuentemente son mucho más grandes que en el procesamiento de CI, donde la tendencia prevaleciente en la microelectrónica es inexorablemente hacia densidades de circuito más altas y hacia la miniaturización. 3) Entre las estructuras producidas en la microfabricación se incluyen voladizos y puentes y otras formas que requieren espacios entre las capas. Estos tipos de estructuras no son comunes en la fabricación de CI. 4) En ocasiones, las técnicas de procesamiento del silicio se complementan para obtener una estructura tridimensional u otra característica física en el microsistema.

No obstante estas diferencias, debe reconocerse que la mayoría de los pasos usados en la microfabricación para el procesamiento del silicio son iguales o muy parecidos a los usados para producir CI. Después de todo, el silicio se usa tanto para los circuitos integrados como para los microdispositivos. Los pasos del procesamiento se enlistan en la tabla 37.2, junto con breves descripciones. Todos estos pasos del proceso se analizaron en capítulos previos. Al igual que en la fabricación de CI, los diferentes procesos de la tabla 37.2 agregan, alteran o remueven capas de material de un sustrato de acuerdo con los datos geométricos contenidos en mascarillas litográficas. La litografía es la tecnología fundamental que determina la forma del microdispositivo que se está fabricando.

En relación con la lista de las diferencias entre la fabricación de CI y la de microdispositivos, el tema de la proporción dimensional debe abordarse en mayor detalle. Las estructuras en el procesamiento de CI son básicamente planares, mientras que en los microsistemas es más probable que se requieran estructuras tridimensionales. Es común que los elementos de los microdispositivos posean relaciones de altura sobre anchura muy altas. Estas características tridimensionales pueden producirse en silicio monocristalino mediante ataque químico húmedo, siempre que la estructura de cristal esté orientada para permitir el proceso de ataque químico y se proceda de manera anisotrópica. El ataque químico húmedo de silicio policristalino es isotrópico, con la formación de cavidades bajo los bordes del material resistente, como se ilustra en la figura 35.13. Sin embargo, en el silicio monocristalino, la velocidad del ataque químico depende de la orientación de la estructura reticular. En la figura 37.7 se ilustran las tres caras de la estructura reticular cúbica del silicio. Ciertas soluciones de ataque químico, como el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH), tienen una velocidad de ataque muy baja en la dirección de la cara del cristal (111). Esto permite la formación de distintas estructuras geométricas con bordes agudos en un sustrato de silicio monocristalino cuya retícula está orientada para favorecer la penetración del ataque en forma vertical o a ángulos agudos en el sustrato. Las estructuras como las de la

TABLA 37.2 Procesos con capas de silicio usados en la microfabricación.

Proceso	Descripción breve	Referencia en el texto
Litografía	Proceso de impresión usado para transferir copias de un patrón de mascarilla sobre la superficie de silicio u otro material sólido (por ejemplo, dióxido de silicio). La técnica usual en la microfabricación es la fotolitografía.	Sección 35.3
Oxidación térmica	(Adición de capa) Oxidación de la superficie de silicio para formar una capa de dióxido de silicio.	Sección 35.4.1
Deposición química de vapor	(Adición de capa) Formación de una película delgada sobre la superficie de un sustrato mediante reacciones químicas o descomposición de gases.	Secciones 29.4 y 35.4.2
Deposición física de vapor	(Adición de capa) Familia de procesos de deposición en la que un material se convierte a la fase de vapor y se condensa sobre una superficie de sustrato como una película delgada. Los procesos de PVD incluyen la evaporación al vacío y el bombardeo de partículas atómicas.	Sección 29.3
Galvanoplastia y electroformado	(Adición de capa) Proceso electrolítico en el que se depositan iones metálicos en solución sobre un material de trabajo catódico.	Secciones 29.1.1 y 29.1.2
Chapeado sin electricidad	(Adición de capa) Deposición en una solución acuosa que contiene iones del metal de chapeado sin corriente eléctrica externa. La superficie de trabajo actúa como un catalizador para la reacción.	Sección 29.1.3
Difusión térmica (dopado)	(Alteración de capa) Proceso físico en el que los átomos migran desde regiones de alta concentración hacia regiones de baja concentración.	Secciones 28.3.1 y 35.4.3.
Implantación iónica (dopado)	(Alteración de capa) Inserción de átomos de uno o más elementos en un sustrato usando un haz de partículas ionizadas con alta energía.	Secciones 28.3.2 y 35.4.3
Ataque químico húmedo	(Remoción de capa) Aplicación de un solvente químico en solución acuosa para atacar un material objetivo, usualmente en conjunción con un patrón de mascarilla.	Sección 35.4.5
Ataque químico en seco	(Remoción de capa) Ataque químico con plasma seco usando un gas ionizado para atacar un material objetivo.	Sección 35.4.5

figura 37.8 pueden crearse mediante el uso de este procedimiento. Debe observarse que el ataque químico húmedo anisotrópico también es deseable en la fabricación de CI (sección 35.4.5), pero su consecuencia es mayor en la microfabricación debido a sus proporciones dimensionales mucho más grandes. El término ***micromaquinado de volumen*** se usa para el proceso de ataque químico húmedo relativamente profundo dentro de un sustrato de silicio monocristalino (oblea de silicio); mientras que el término ***micromaquinado superficial*** se refiere a la estructuración planar de la superficie del sustrato, usando procesos de formación de capas mucho más someros.

El micromaquinado de volumen puede usarse para crear membranas delgadas en una microestructura. Sin embargo, se requiere un método para controlar la penetración del ataque químico en el silicio, de manera que efectivamente deje la capa de la membrana. Un método común que se utiliza para este propósito consiste en dopar el sustrato de silicio con átomos de boro, lo que reduce en forma significativa la velocidad del ataque químico al silicio. En la figura 37.9 se muestra la secuencia de procesamiento. En el paso 2) se usa la deposición epitaxial para aplicar la capa superior del silicio, de forma que posea la misma estructura monocristalina y la orientación reticular que el sustrato (sección 35.4.2). Éste es un requerimiento del micromaquinado de volumen que se usará para proporcionar la región atacada de manera profunda en el procesamiento subsecuente. El uso del dopado con

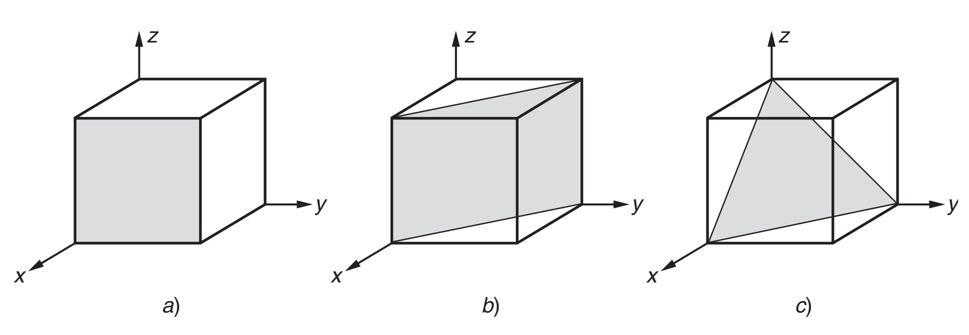


FIGURA 37.7 Tres caras cristalinas en la estructura reticular cúbica del silicio: *a*) cara del cristal (100), *b*) cara del cristal (110) y *c*) cara del cristal (111).

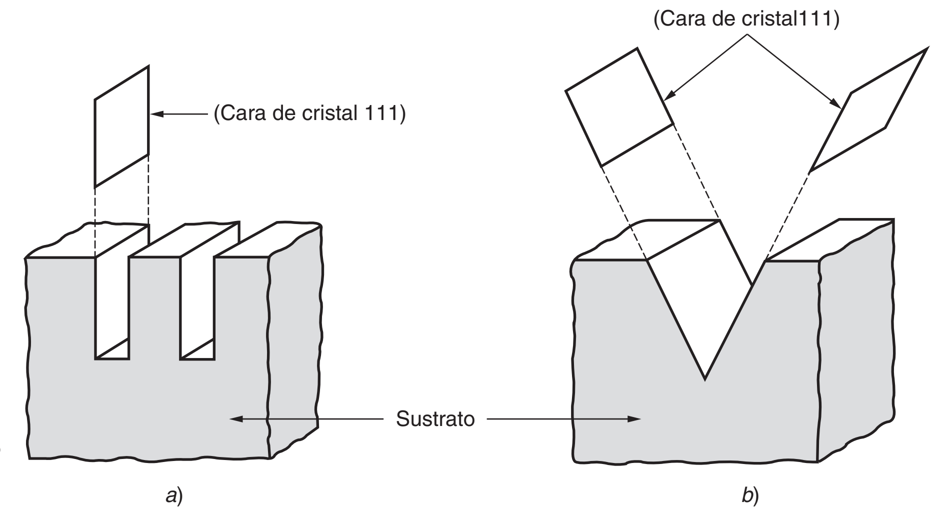


FIGURA 37.8 Varias estructuras que pueden formarse en un sustrato de silicio monocristalino mediante micromaquinado de volumen: *a*) silicio (110) y *b*) silicio (100).

boro para establecer la capa de silicio resistente al ataque químico se denomina la ***técnica*** p^+ ***para contención del ataque químico***.

El micromaquinado superficial puede usarse para construir voladizos, colgantes y estructuras similares sobre un sustrato de silicio, como se muestra en el inciso 5 de la figura 37.10. Las vigas en voladizo de la figura son paralelas a la superficie del silicio y están separadas de ésta por un espacio determinado. El tamaño de la separación y el espesor de la viga están en el rango de los micrones. La secuencia del proceso para fabricar este tipo de estructura se muestra en los primeros incisos de la figura 37.10.

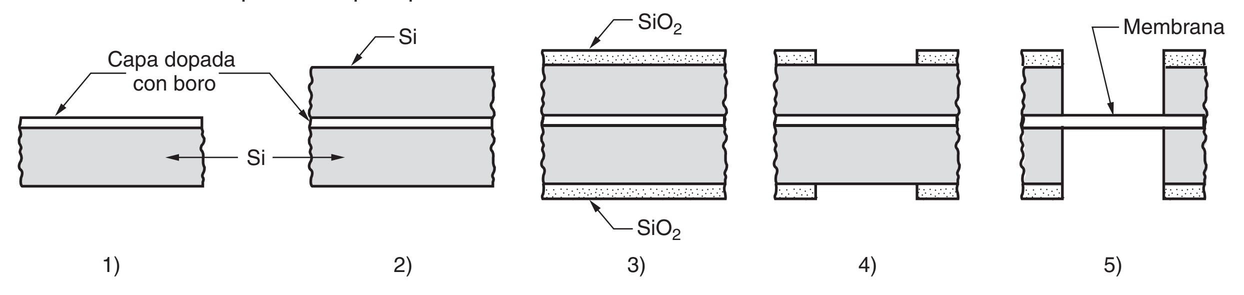
El ataque químico en seco, que implica la remoción de material a través de la interacción física o química entre los iones en un gas ionizado (un plasma) y los átomos de una superficie que ha sido expuesta al gas ionizado (sección 35.4.5), proporciona ataque químico anisotrópico en casi cualquier material. Su penetración anisotrópica no está limitada a un sustrato de silicio monocristalino. Por otro lado, la selectividad del ataque representa un problema en el ataque químico en seco; esto es, cualesquiera superficies expuestas al plasma son atacadas.

En microfabricación se usa un procedimiento llamado ***técnica de levantamiento*** para metales de patrón como el platino sobre un sustrato. Estas estructuras se usan en ciertos sensores químicos, pero son difíciles de producir mediante ataque químico húmedo. En la figura 37.11 se ilustra la secuencia del proceso en la técnica de levantamiento.

37.2.2 Proceso LIGA

El proceso LIGA es una tecnología importante en las MST. Fue creado en Alemania a principios de la década de 1980, y las letras ***LIGA*** se deben a los términos en alemán ***LI***thographie (en particular, litografía con rayos X), ***G***alvanoformung (que se traduce como

FIGURA 37.9 Formación de una membrana delgada en un sustrato de silicio: 1) el sustrato de silicio se dopa con boro, 2) se aplica una capa gruesa de silicio sobre la capa dopada mediante deposición epitaxial, 3) ambos lados se oxidan térmicamente para formar una resistencia de SiO_2 sobre las superficies, 4) el resistente se forma mediante litografía y 5) se usa ataque químico anisotrópico para remover el silicio, excepto en la capa dopada con boro.



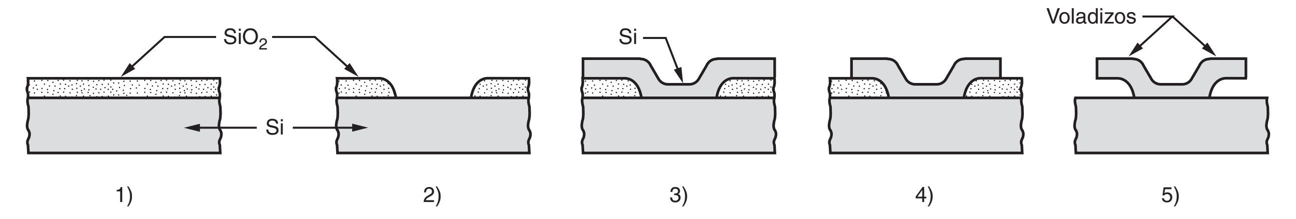


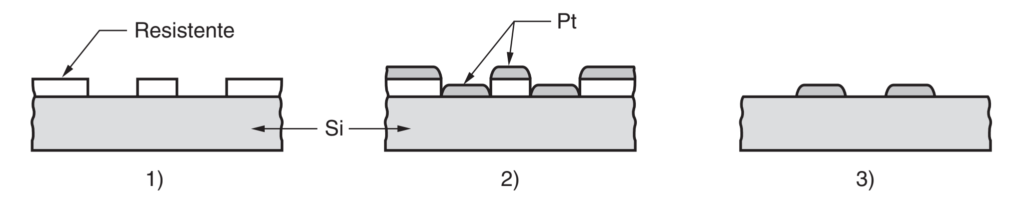
FIGURA 37.10 Micromaquinado superficial para formar voladizos: 1) sobre el sustrato de silicio se forma una capa de dióxido de silicio, cuyo espesor determinará el tamaño de la separación para el elemento en voladizo, 2) porciones de la capa de SiO_2 se atacan químicamente usando litografía, 3) se aplica una capa de polisilicio, 4) se atacan químicamente porciones de la capa de polisilicio usando litografía y 5) la capa de SiO_2 debajo de los voladizos se ataca de manera selectiva.

electrodeposición o electroformado) y **A**bformtechnik (moldeado, en particular, moldeado plástico). Las letras también indican la secuencia de procesamiento LIGA. Estos pasos del procesamiento se han descrito cada uno por su lado en una sección previa de este libro: litografía con rayos X en la sección 35.3.2; electrodeposición y electroformado en las secciones 29.1.1 y 29.1.2, respectivamente; y los procesos de moldeado plástico en las secciones 13.6 y 13.7. Examine cómo se integran en la tecnología LIGA.

Los pasos de procesamiento LIGA se ilustran en la figura 37.12. A continuación se explican con detalle a partir de la breve descripción proporcionada en las leyendas de la figura: 1) Se aplica al sustrato una capa gruesa de resistente sensible a la radiación (rayos X). El espesor de la capa va desde varias micras hasta centímetros, dependiendo del tamaño de la pieza o piezas que deben producirse. El material resistente común que se utiliza en LIGA es el polimetilmetacrilato (PMMA, sección 8.2.2 bajo el título "Acrílicos"). El sustrato debe ser un material conductor para el siguiente proceso de electrodeposición realizado. El material resistente se expone a través de una mascarilla a radiación de rayos X de alta energía. 2) Las áreas irradiadas del resistente positivo se remueven químicamente de la superficie del sustrato, dejando las porciones no expuestas como una estructura plástica tridimensional. 3) Las regiones donde se ha removido el resistente se llenan con metal usando electrodeposición. El metal de chapeado común que se usa en LIGA es el níquel. 4) La estructura resistente que se conserva es desprendida (removida), con lo que se obtiene una estructura de metal tridimensional. Dependiendo de la forma creada, esta estructura metálica puede ser: *a*) el molde usado para producir piezas plásticas mediante moldeado por inyección, moldeado por inyección a reacción o moldeado por compresión. En el caso del moldeado por inyección, donde se producen piezas termoplásticas, estas piezas pueden usarse como "moldes perdidos" en la fundición por inversión (sección 11.2.4). De manera alternativa, *b*) la pieza de metal puede ser un patrón para fabricar moldes plásticos que serán usados para producir más piezas metálicas por electrodeposición.

Como lo indica la descripción, LIGA puede producir piezas mediante varios métodos diferentes. Ésta es una de las mayores ventajas de este proceso en la MST: 1) LIGA es un proceso versátil. Otras ventajas de la tecnología LIGA son: 2) son posibles las altas proporciones dimensionales (grandes relaciones de altura sobre anchura en la pieza fabricada), 3) es posible un rango amplio en los tamaños de las piezas, con alturas que van de

FIGURA 37.11 La técnica de levantamiento: 1) se aplica el resistente al sustrato, el cual se estructura mediante litografía; 2) el platino se deposita sobre las superficies y 3) el resistente se retira, llevando consigo el platino sobre su superficie, pero dejando la microestructura de platino deseada.



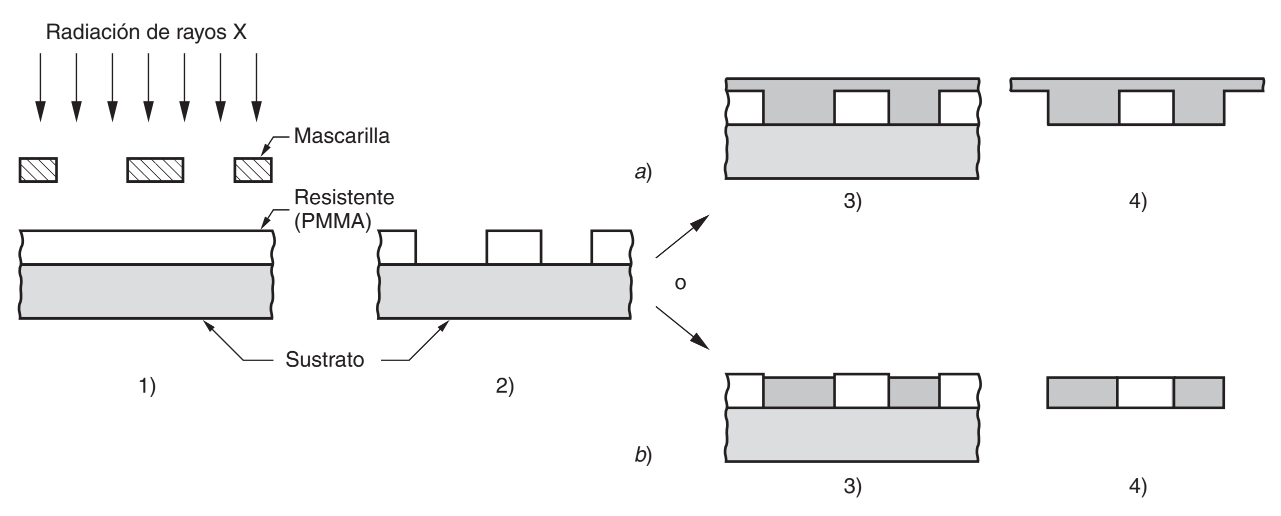


FIGURA 37.12 Pasos del procesamiento LIGA: 1) aplicación de una capa gruesa de material resistente y exposición a los rayos X a través de una mascarilla, 2) remoción de las porciones expuestas de el resistente, 3) electrodeposición para llenar las aberturas en el resistente, 4) desprendimiento del resistente para obtener *a*) un molde o *b*) una pieza metálica.

los micrómetros a los centímetros; y 4) pueden satisfacerse tolerancias estrechas. Una desventaja significativa del proceso LIGA es que resulta muy costoso, por lo que se requieren grandes cantidades de piezas para justificar su aplicación.

37.2.3 Otros procesos de microfabricación

Pese a que los principales procesos que se usan en la microfabricación son los que se describieron en las secciones anteriores, la investigación en MST está produciendo varias técnicas de fabricación adicionales, la mayoría de las cuales son adaptaciones de procesos a escala completa. En esta sección se analizan algunas de estas técnicas adicionales.

Procesos tradicionales y no tradicionales en microfabricación Existe cierta cantidad de procesos de maquinado no tradicional (capítulo 26), así como de procesos convencionales de manufactura, que son importantes en la microfabricación. El ***maquinado fotoquímico*** (PCM, sección 26.4.2) es un proceso esencial en el procesamiento de CI y en la microfabricación, pero se ha hecho referencia a éste en las descripciones del presente capítulo y en el capítulo 35 como ataque químico húmedo (combinado con fotolitografía). A menudo el PCM se usa con procesos muy convencionales, como ***galvanoplastia***, ***electroformado*** o ***chapeado sin electricidad*** (sección 29.1), para agregar capas de materiales metálicos de acuerdo con mascarillas de patrón microscópicas.

Entre otros procesos no tradicionales capaces del procesamiento a nivel micro están [7]: 1) ***maquinado con descarga eléctrica***, que se usa para cortar orificios pequeños de hasta 0.3 mm de diámetro con proporciones dimensionales (profundidad sobre diámetro) de hasta 100; 2) *maquinado con* ***haz de electrones***, para cortar orificios con diámetros menores a 100 μm en materiales difíciles de maquinar; 3) ***maquinado con haz láser***, el cual puede producir perfiles complejos y orificios tan pequeños como de 10 μm de diámetro, con proporciones dimensionales (profundidad sobre anchura o profundidad sobre diámetro) cercanas a 50; 4) ***maquinado ultrasónico***, capaz de perforar orificios en materiales duros y frágiles con diámetros tan pequeños hasta de 50 μm; y 5) ***corte por descarga eléctrica con alambre***, o ***EDM con alambre***, el cual puede realizar cortes muy delgados con proporciones dimensionales (profundidad sobre anchura) mayores que 100.

Las tendencias en el maquinado convencional han incluido sus capacidades para lograr tamaños de corte y tolerancias asociadas cada vez más pequeñas. Las tecnologías conocidas como ***maquinado de ultraalta precisión*** incluyen las herramientas de corte con

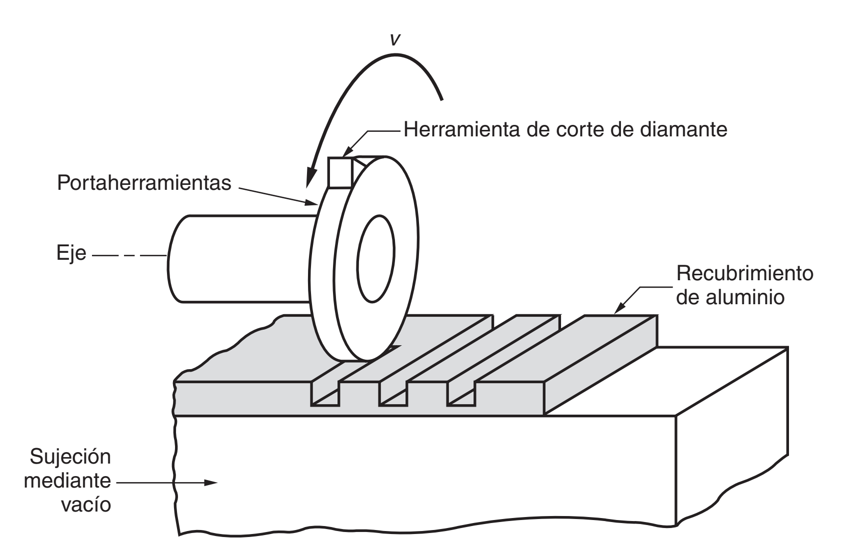


FIGURA 37.13 Fresado de ultraalta precisión para realizar surcos en un recubrimiento de aluminio.

diamante monocristalino y sistemas de control de la posición con resoluciones tan finas como 0.01 μm [7]. En la figura 37.13 se muestra una aplicación de este tipo: el fresado de surcos en un recubrimiento de aluminio usando un cortador móvil con punta de diamante monocristalino. El recubrimiento de aluminio tiene un espesor de 100 μm y los surcos tienen 85 μm de ancho y 70 μm de profundidad. En la actualidad se aplica un maquinado de ultraalta precisión similar para fabricar productos como discos duros de computadora, tambores de fotocopiadora, insertos de molde para cabezas lectoras de discos compactos, lentes de proyección para televisión de alta definición y cabezas de exploración en videocaseteras.

Tecnologías para la creación rápida de prototipos Algunos métodos para la creación rápida de prototipos (RP, capítulo 34) se han adaptado para producir piezas con tamaño microscópico [8]. Los métodos de RP usan un enfoque con agregación de capas para construir componentes tridimensionales, basados en un modelo geométrico en CAD (diseño asistido por computadora). Cada capa es muy delgada, típicamente de hasta 0.05 mm de espesor, lo cual se aproxima a la escala de las tecnologías de microfabricación. Si las capas se hacen aún más delgadas, es posible fabricar microcomponentes. En el momento de escribir este texto, las dos técnicas analizadas aquí aún están en investigación y desarrollo.

Existe un enfoque denominado ***fabricación electromecánica*** (EFAB), el cual implica la deposición electromecánica de capas metálicas en áreas específicas que están determinadas por mascarillas de patrón creadas mediante el "rebanado" de un modelo en CAD del objeto que va a fabricarse (sección 34.1). Por lo general, las capas depositadas tienen un espesor de 5 a 10 μm, con tamaños de elementos tan pequeños como 20 μm de ancho. La EFAB se lleva a cabo a temperaturas por debajo de los 60 °C (140 °F) y no requiere un ambiente de sala limpia. Sin embargo, el proceso es lento, se requiere alrededor de 40 minutos para aplicar cada capa, o se completan cerca de 36 capas (una altura entre 180 y 360 μm) en un periodo de 24 horas. Para superar esta desventaja, la mascarilla para cada capa puede contener muchas copias del patrón de la rebanada de la pieza, lo que permite producir muchas piezas de manera simultánea en un proceso por lotes.

Otro enfoque de RP, llamado ***microestereolitografía***, se basa en la estereolitografía (STL), pero la escala de los pasos de procesamiento se reduce en tamaño. Hay que tener en cuenta que el espesor de las capas en la estereolitografía convencional va desde 75 μm hasta 500 μm; de manera típica la microestereolitografía (MSTL) usa espesores de capa entre 10 y 20 μm, e incluso es posible fabricar capas más delgadas. Por lo general, el punto de láser en la STL tiene un diámetro de 250 μm, mientras que en la MSTL se usa un punto de láser con un tamaño de hasta 1 o 2 μm. Otra diferencia en la MSTL es que el material de trabajo no se limita a un polímero fotosensible. Los investigadores reportan la fabricación exitosa de microestructuras tridimensionales a partir de materiales cerámicos y metálicos. La diferencia es que el material inicial es un polvo en vez de un líquido.

Fotofabricación Este término se aplica a un proceso industrial en el que la exposición ultravioleta a través de una mascarilla de patrón causa una modificación significativa en la solubilidad química de un material óptimamente claro. El cambio se manifiesta en la forma de un incremento de la solubilidad en ciertos productos químicos. Por ejemplo, el ácido fluorhídrico ataca químicamente a un vidrio fotosensible expuesto a UV entre 15 y 30 veces más rápido que un vidrio del mismo tipo que no ha sido expuesto. Durante el ataque químico no se requiere el enmascarado, porque la diferencia en la solubilidad es el factor determinante para saber cuáles porciones del vidrio serán removidas.

En realidad, la fotofabricación precedió al microprocesamiento del silicio. Ahora, con el crecimiento de la importancia de las tecnologías de microfabricación, existe un interés renovado en la tecnología más antigua. Los ejemplos de materiales modernos utilizados en la fotofabricación incluyen los vidrios Fotoform™ de Corning Glass Works, las cerámicas Fotoceram™ y los polímeros sólidos fotosensibles de Dupont Dycril y Templex. Con el procesamiento de estos materiales, pueden obtenerse proporciones dimensionales de alrededor de 3:1 con los polímeros y de 20:1 con los vidrios y cerámicas.

REFERENCIAS

[1] Ashley, S., "Getting a Hold on Mechatronics", ***Mechanical Engineering***, vol. 119, núm. 5, mayo de 1997, pp. 60-63.

[2] DeGaspari, J., "Shake, Rattle, and Roll", ***Mechanical Engineering***, noviembre de 2001, pp. 56-58.

[3] DeGaspari, J., "Pumped Up", ***Mechanical Engineering***, abril de 2005, pp. 34-39.

[4] Fatikow, S. y Rembold, U., ***Microsystem Technology and Microrobotics***, Springer-Verlag, Berlín, 1997.

[5] Goldin. D. Venneri, S. y Noor. A., "The Great out of the Small", ***Mechanical Engineering***, vol. 122, núm. 11, noviembre de 2000, pp. 70-79.

[6] Li, G. y Tseng, A. A., "Low Stress Packaging of a Micromachined Accelerometer", ***IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing***, vol. 24, núm. 1, enero de 2001, pp. 18-25.

[7] Madou, M., ***Fundamentals of Microfabrication***, CRC Press, Boca Raton, Fl., 1997.

[8] O'Connor, L. y Hutchinson, H., "Skycrapers in a Microworld", ***Mechanical Engineering***, vol. 122, núm. 3, marzo de 2000, pp. 64-67.

[9] National Research Council (NRC), ***Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies***, Committee on Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies, The National Academies Press, Washington, D.C., 2002.

[10] Paula, G., "An Explosion in Microsystems Technology", ***Mechanical Engineering***, vol. 119, núm. 9, septiembre de 1997, pp.71-74.

[11] Tseng, A. A. y Mon, J-I., "NSF 2001 Workshop on Manufacturing of Micro-Electro Mechanical Systems", en ***Proceedings of the 2001 NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conference***, National Science Foundation, 2001.

[12] Sitio web: www.distronics.co.uk/technology.

[13] Sitio web: www.ee.washington.edu/conselec/CE/Kuhn/cdaudio.

[14] Sitio web: www.usbyte.com.

PREGUNTAS DE REPASO

37.1. Defina un sistema microelectromecánico.

37.2. ¿Cuál es la escala de tamaño aproximado en la tecnología de microsistemas?

37.3. ¿Por qué es razonable creer que los productos de microsistemas estarán disponibles a un costo más bajo que los productos de un tamaño más grande y convencional?

37.4. ¿Qué es un microsensor híbrido?

37.5. ¿Cuáles son algunos de los tipos básicos de dispositivos de microsistemas?

37.6. Mencione algunos de los productos que representan la tecnología de microsistemas.

37.7. ¿Por qué el silicio es un material de trabajo deseable en la tecnología de microsistemas?

37.8. ¿Qué significa el término "proporción dimensional" en la tecnología de microsistemas?

37.9. ¿Cuál es la diferencia entre el micromaquinado de volumen y el micromaquinado superficial?

37.10. ¿Cuáles son los tres pasos del proceso LIGA?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 14 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

37.1. ¿Cuáles de las siguientes opciones se incluyen en la tecnología de microsistemas? (tres mejores respuestas): *a*) tecnología LIGA, *b*) sistemas microelectromecánicos, *c*) micromáquinas, *d*) nanotecnología y *e*) ingeniería de precisión.

37.2. ¿Cuáles de las siguientes son aplicaciones actuales de la tecnología de microsistemas en los automóviles modernos? (tres mejores respuestas): *a*) sensores para la liberación de bolsas de aire, *b*) sensores para el nivel de alcohol en la sangre, *c*) sensores de identificación del conductor para prevenir robos, *d*) sensores de presión de aceite y *e*) sensores de temperatura para el control del clima en la cabina.

37.3. ¿Cuál de los siguientes es el polímero usado para hacer discos compactos (CD) y discos versátiles digitales (DVD)?: *a*) resina amino, *b*) resina epóxica, *c*) poliamidas, *d*) policarbonato, *e*) polietileno o *f*) polipropileno.

37.4. ¿Cuál de los siguientes es el material de trabajo más común en la tecnología de microsistemas? *a*) boro, *b*) oro, *c*) níquel, *d*) hidróxido de potasio o *e*) silicio

37.5. ¿Cuál de las siguientes opciones define de mejor manera la proporción dimensional en la tecnología de microsistemas?: *a*) grado de anisotropía en los elementos atacados químicamente, *b*) relación de altura sobre anchura de los elementos fabricados, *c*) relación de altura sobre anchura del dispositivo de MST, *d*) relación de longitud sobre anchura de los elementos fabricados, *e*) relación de espesor sobre longitud del dispositivo de MST.

37.6. ¿Cuál de las siguientes formas de radiación tiene longitudes de onda más cortas que la luz ultravioleta usada en fotolitografía? (dos respuestas correctas): *a*) radiación de haz de electrones, *b*) luz natural y *c*) radiación de rayos X.

37.7. El micromaquinado de volumen se refiere al proceso de ataque químico húmedo relativamente profundo dentro de un sustrato de silicio monocristalino: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

37.8. ¿Cuál de los siguientes es el significado de las letras LIGA, en el procesamiento que lleva ese nombre?: *a*) aplicación inmediata; *b*) aparato de esmerilado pequeño; *c*) aplicaciones litográficas; *d*) litografía, electrodeposición y moldeado plástico o *e*) litografía, esmerilado y alteración.

37.9. Fotofabricación es el mismo proceso denominado fotolitografía: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

38 TECNOLOGÍAS DE NANOFABRICACIÓN

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En la actualidad, la tendencia en la miniaturización continúa más allá del rango del micrómetro hacia la escala del nanómetro (nm). La ***nanotecnología*** se refiere a la fabricación y la aplicación de entidades cuyos tamaños de características están en el rango de alrededor de 1 nm a 100 nm (1 nm = 10^{-3}, μm = 10^{-6}, mm = 10^{-9} m). Las entidades incluyen estructuras, películas, recubrimientos, puntos, líneas, alambres, tubos y sistemas. El prefijo "nano" se usa para estos artículos; así, se tienen palabras nuevas como nanoestructura, nanotubo, nanoescala y nanociencia, que incluso no se encuentran en los diccionarios más recientes en el momento de escribir este texto. ***Nanociencia*** es el campo del estudio científico relacionado con objetos en el rango desde 1 hasta 100 nm. ***Nanoescala*** se refiere a las dimensiones dentro de este rango y un poco debajo de él, el cual se traslapa en el extremo inferior con los tamaños de los átomos y las moléculas. Por ejemplo, el átomo más pequeño es el helio, con un diámetro cercano a 0.1 nm. El uranio tiene un diámetro de alrededor de 0.22 nm y es el más grande de los átomos que se presentan en forma natural. Las moléculas tienden a ser más grandes porque consisten en muchos átomos. Las moléculas que constan de alrededor de 30 átomos tienen un tamaño aproximado de 1 nm, dependiendo de los elementos involucrados. Por lo tanto, la nanociencia implica el comportamiento de moléculas individuales y los principios que explican este comportamiento, y la nanotecnología involucra la aplicación de estos principios para crear productos útiles.

Los campos de la nanociencia y la nanotecnología son interdisciplinarios. Recaen en las contribuciones sinergísticas de la química, la física, diferentes disciplinas de ingeniería y ciencia de la computación. Los campos de la biología y la ciencia médica también están involucrados. La biología funciona en el rango de la nanoescala. Las proteínas, que son las sustancias básicas en los organismos vivos, son moléculas grandes con un tamaño que va desde 4 nm hasta 50 nm. Las proteínas están hechas de aminoácidos (ácidos orgánicos que contienen el grupo amino NH_2), cuyo tamaño molecular es de alrededor de 0.5 nm. Cada

TABLA 38.1 Ejemplos de productos y materiales actuales y futuros que se basan en nanotecnología.

Computadoras. Nanotubos de carbono (sección 38.1.3) son fuertes candidatos a sustituir a los dispositivos electrónicos basados en silicio cuando la reducción del tamaño supere los límites del proceso basado en la litografía que se usa para hacer circuitos integrados sobre obleas de silicio. Se espera que estos límites se alcancen alrededor del año 2015.

Materiales. Las partículas a nanoescala (nanopuntos) y las fibras a nanoescala (nanoalambres) pueden probar su utilidad en el refuerzo de agentes para materiales compuestos. Por ejemplo, la caja para uno de los vehículos Hummer de General Motors está hecho con nanocompuestos. Algunos sistemas de materiales completamente nuevos, que aún no se conocen, pueden ser posibles con la nanotecnología.

Catalizadores de nanopartículas. Las nanopartículas metálicas y los recubrimientos de metales nobles (por ejemplo, oro y platino) sobre sustratos cerámicos actúan como catalizadores para ciertas reacciones químicas. Un ejemplo importante lo constituyen los convertidores catalíticos en automóviles.

Medicamentos para el cáncer. Se están desarrollando medicamentos a nanoescala que estarán diseñados para coincidir con el perfil genético específico de las células de cáncer de un paciente y para atacar y destruir dichas células. Por ejemplo, la Abraxina es una medicina basada en proteínas a nanoescala producida por American Pharmaceutical, que se usa para el tratamiento del cáncer metastático de seno.

Energía solar. Las películas superficiales a nanoescala tienen el potencial de absorber más de la energía electromagnética del sol que los receptáculos fotovoltaicos existentes. Los descubrimientos en esta área pueden reducir la dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía.

Recubrimientos. Se están creando recubrimientos y películas ultradelgadas a nanoescala que incrementarán la resistencia a la raspadura en superficies (ya existen cristales para anteojos con recubrimientos de este tipo), la resistencia a las manchas de telas y las capacidades de autolimpieza para ventanas y otras superficies (el “efecto lotus”).

Pantallas planas para monitores de televisión y computadoras. Se han creado pantallas de televisión basadas en nanotubos de carbono que se introdujeron en 2006. Se espera que sean más brillantes, menos costosas y tengan mayor eficiencia energética que las pantallas actuales. Serán producidas por Samsung Electronics de Corea del Sur.

Laboratorios médicos portátiles. Los instrumentos basados en la nanotecnología proporcionarán un análisis rápido de una variedad de padecimientos, como la diabetes y el VIH.

Baterías. Los nanotubos de carbono pueden ser los componentes futuros en baterías de alta energía y dispositivos de almacenamiento para hidrógeno. Sin duda, el almacenamiento de hidrógeno tendrá un papel importante en la conversión de motores que utilizan combustibles fósiles a motores basados en hidrógeno.

Fuentes de luz. Se han estado inventando lámparas basadas en nanotecnología que usan una fracción de la energía de una bombilla de luz incandescente y que nunca se funden.

Basada principalmente en [1] y [19].

molécula de proteína consiste en combinaciones de diferentes moléculas[1] de aminoácido conectadas entre sí para formar una cadena larga (puede llamarse nanoalambre). Esta macromolécula larga se dobla y se enrolla para compactarse en una masa con una sección cruzada en el rango de los 4 a los 50 nm. Entre las entidades biológicas con tamaños a nanoescala se incluyen las moléculas de clorofila en las plantas (alrededor de 1 nm), la hemoglobina en la sangre (7 nm) y los virus del resfriado (60 nm). Las células biológicas tienen órdenes de magnitud más grandes. Por ejemplo, un glóbulo rojo tiene una forma de disco con diámetros de alrededor de 8000 nm (8 μm) y espesores de alrededor de 1500 nm (1.5 μm).

El interés de este capítulo está en los objetos y materiales a nanoescala no biológicos. Las entidades a nanoescala ya se han usado ampliamente de varias maneras; por ejemplo, considere las siguientes aplicaciones.

- Las coloridas ventanas con vitrales para las iglesias construidas durante la Edad Media se basaban en partículas de oro de escala nanométrica incrustadas en el cristal. Dependiendo de su tamaño, las partículas pueden tener una variedad de colores.
- La fotografía moderna tiene raíces que datan de más de 150 años y depende de la formación de nanopartículas de plata para crear la imagen de la fotografía.
- Las partículas de carbono a nanoescala se usan como relleno de refuerzo en las llantas para automóvil.
- Los convertidores catalíticos requeridos en los sistemas de emisión de los automóviles modernos emplean recubrimientos de platino y paladio a nanoescala sobre una estructura cerámica en forma de panal. Los recubrimientos metálicos actúan como catalizadores para convertir la emisión de gases nocivos en gases no dañinos.

En la tabla 38.1 se presenta una lista de los productos actuales y probablemente futuros que se basan en la nanotecnología.

[1]Existen más de 100 diferentes aminoácidos que se presentan de manera natural, pero la mayoría de las proteínas que se encuentran en los organismos vivos consisten en sólo 20 de estos tipos de aminoácidos.

La creación de productos con al menos algunos tamaños característicos en el rango de los nanómetros requiere técnicas de fabricación que a menudo son muy diferentes de las que se usan para procesar materiales en masa y productos de tamaño macro. La nanofabricación se refiere a estas técnicas que pueden usarse para producir entidades en el rango de 1 a 100 nm. En este capítulo se presenta un tratamiento introductorio de las tecnologías de nanofabricación. Antes de discutir los métodos de procesamiento, se proporcionará una introducción general a la nanotecnología, incluyendo algunos de los retos que se enfrentan en la implementación de esta tecnología nueva y excitante.

38.1 INTRODUCCIÓN A LA NANOTECNOLOGÍA

Lo que hace a la nanotecnología difícil de comprender para el público en general es el hecho de que trata con cosas tan pequeñas. La nanotecnología tiene que ver con objetos que no son mucho más grandes que los átomos y las moléculas que los forman. En la sección 38.1.1 se analizan estos "efectos del tamaño" y cómo se ven afectadas las propiedades de los materiales cuando las dimensiones de una entidad se miden en nanómetros. La incapacidad de "ver" objetos a nanoescala ha inhibido los desarrollos en nanotecnología hasta años recientes. El advenimiento de los microscopios de sonda exploratoria en la década de 1980 ha permitido que se visualice y midan objetos a nivel molecular. Estos tipos de microscopios se describen en la sección 38.1.2. Dos entidades a nanoescala de interés científico y comercial significativo son los fullerenos y nanotubos de carbono, que se estudian en la sección 38.1.3.

38.1.1 La importancia del tamaño

Uno de los efectos físicos que ocurre con los objetos muy pequeños es que sus propiedades superficiales se vuelven mucho más importantes en relación con las propiedades de su volumen. Considere la razón de superficie sobre volumen de una cantidad dada de material conforme cambian sus dimensiones. Se comenzará con un bloque cúbico de material que tiene un metro en cada uno de sus lados. Su área superficial total es de 6 m^2 y su volumen es de 1 m^3, lo que resulta en una relación de superficie sobre volumen de 6 a 1. Si su mismo volumen de material fuera ahora comprimido en una placa cuadrada de 1 μm de espesor (0.00004 in, o alrededor de 100 veces más pequeño que el diámetro de un cabello humano), sus dimensiones serían de 1000 m por lado y su superficie total (superior, inferior y bordes) sería 2 000 000.004 m^2 (1000×1000 m^2 en cada uno de sus dos lados, más 0.001 m^2 en cada uno de los cuatro bordes). De esto se obtendría una relación de superficie sobre volumen un poco mayor que 2 000 000 a 1.

Enseguida, suponga que la placa plana se divide en dos direcciones para crear cubos que son de 1 $\mu m \times 1 \mu m \times 1 \mu m$. El número total de cubos sería de 10^{18}, y el área superficial de cada cubo sería de 6 μm^2 o $6(10^{-12})$ m^2. Al multiplicar el área superficial de cada cubo por el número de cubos, se obtiene un área superficial total de 6 000 000 m^2 o una relación de superficie sobre volumen de 6 000 000 a 1 para la cantidad original de material.

Un cubo que tiene 1 μm de lado ciertamente es pequeño, pero en nanómetros, tiene 1000 nm en cada borde, Suponga que las moléculas de este material tienen forma cúbica, y del análisis anterior, cada molécula mide 1 nm por lado (es verdad que la forma molecular cúbica es exagerada, pero el tamaño de 1 nm es posible). Esto significa que el cubo de 1 μm contiene 10^9 moléculas, de las cuales $6(10^6)$ están en la superficie del cubo. Lo anterior implica que $10^9 - 6(10^6) = 994(10^6)$ moléculas son internas (están debajo de la superficie). La relación de moléculas internas sobre superficiales es de 994 a 6 o 165.667 a 1. En comparación, la misma relación para un cubo de 1 m de lado es de alrededor de 10^{27} a 1. Conforme el tamaño del cubo decrece, la relación de moléculas internas sobre superficiales se hace cada vez más pequeña, hasta que finalmente se tiene un cubo que tiene 1 nm de lado (el tamaño de la molécula) y no hay moléculas internas. Lo que demuestra este ejercicio numérico es que conforme disminuye el tamaño de un objeto, acercándose a las dimensiones de nanómetros, las moléculas superficiales se vuelven cada vez más importantes en relación con las moléculas

internas simplemente por su proporción numérica creciente. Así, las propiedades superficiales de los materiales de los que están hechos los objetos con tamaños en nanómetros se vuelven más influyentes en la determinación del comportamiento de los objetos, mientras que la influencia relativa de las propiedades del volumen del material se reduce.

Recuerde, de la sección 2.2, que existen dos tipos de unión atómica: 1) uniones primarias que generalmente se asocian con la combinación de átomos en moléculas y 2) uniones secundarias donde las moléculas se atraen para formar materiales con volumen. Una de las implicaciones de las razones de superficie sobre grandes volúmenes que se dan en los objetos a nanoescala es que las uniones secundarias que existen entre las moléculas asumen una mayor importancia, porque la forma y las propiedades de un objeto, que no es mucho más grande que las moléculas que lo forman, tienden a depender de estas fuerzas de unión secundaria. De acuerdo con esto, las propiedades del material y los comportamientos de las estructuras a nanoescala son diferentes de los de las estructuras con dimensiones en la macroescala e incluso en la microescala. Algunas veces, estas diferencias pueden explotarse para crear materiales y productos con propiedades electrónicas, magnéticas y/u ópticas mejoradas. Dos ejemplos de materiales recientemente creados en esta categoría son 1) los nanotubos de carbono (que se analizan en la sección 38.1.3), que poseen alta resistencia y propiedades electrónicas únicas, y 2) materiales magnetorresistentes para su uso en memorias magnéticas de alta densidad. La nanotecnología permitirá el desarrollo de clases de materiales completamente nuevas.

Otra diferencia que surge entre los objetos a nanoescala y sus contrapartes macroscópicas es que el comportamiento del material tiende a verse influido por la mecánica cuántica en vez de por las propiedades del volumen. La ***mecánica cuántica*** es una rama de la física que tiene que ver con la noción de todas las formas de energía (por ejemplo, electricidad, luz) que ocurren en unidades discretas o paquetes cuando se observan a una escala suficientemente pequeña. Las unidades discretas o paquetes se llaman cuantos, los cuales no pueden subdividirse. Por ejemplo, la electricidad se conduce en unidades de electrones. No es posible una carga eléctrica de menos de un electrón. En la energía luminosa, los cuantos son fotones. En la energía magnética, se llaman magnones. Para todos los tipos de energía existen unidades comparables. Todos los fenómenos físicos muestran un comportamiento de cuantos en el nivel submicroscópico. En un nivel macroscópico, la energía parece ser continua porque se libera en cantidades muy grandes de cuantos.

El movimiento de electrones en la microelectrónica es de interés particular por las significativas reducciones en el tamaño que continúan lográndose en la fabricación de circuitos integrados. Los tamaños característicos de los dispositivos en los circuitos integrados producidos en 2004 son del orden de 90 nm. Se proyecta que su tamaño se reduzca a alrededor de 20 nm aproximadamente para el año 2015. Con un tamaño de características de alrededor de 10 nm, los efectos de la mecánica cuántica se vuelve significativa, cambiando la forma en la que funciona un dispositivo. Conforme continúa reduciéndose el tamaño de las características hacia unos cuantos nanómetros, la proporción de los átomos superficiales en el dispositivo se incrementa en relación con los que se encuentran por debajo de la superficie, lo que significa que las características eléctricas ya no están determinadas de manera exclusiva por las propiedades del volumen del material. A medida que el tamaño continúa decreciendo y la densidad de componentes en un chip se siga incrementando, la industria electrónica se estará aproximando a los límites de la factibilidad tecnológica de los procesos de fabricación actuales que se analizaron en el capítulo 35.

38.1.2 Microscopios de sonda exploratoria

Los microscopios ópticos convencionales usan luz visible enfocada a través de lentes ópticos para proporcionar imágenes agrandadas de objetos muy pequeños. Sin embargo, la longitud de onda de la luz visible es de 400 a 700 nm, lo cual es mayor que las dimensiones de los objetos en nanómetros. Así, estos objetos no pueden verse con microscopios ópticos convencionales. Los microscopios ópticos más poderosos proporcionan amplificaciones de alrededor de 1 000 veces, lo que permite resoluciones de alrededor de 0.0002 mm (200 nm).

En la década de 1930 se inventaron los microscopios electrónicos, que permiten visualizar especímenes utilizando un haz de electrones en lugar de luz. El haz de electrones puede considerarse como una forma de movimiento en ondas, pero que tiene una longitud de onda efectiva mucho más corta. (Los microscopios electrónicos actuales permiten amplificaciones de alrededor de 1 000 000 de veces y resoluciones de aproximadamente un nanómetro). Para obtener una imagen de una superficie, el haz de electrones explora la superficie de un objeto en un patrón de trama, similar a la forma en que un rayo catódico explora la superficie de una pantalla de televisión.

Para hacer observaciones en el nivel de la nanoescala, se realizó una mejora a los microscopios electrónicos, que es la familia de instrumentos de sonda exploratoria que data de la década de 1980. Éstos poseen capacidades de amplificación aproximadamente 10 veces más grandes que las de un microscopio electrónico. En los instrumentos de sonda exploratoria, la sonda consiste en una aguja con una punta muy delgada. El tamaño de la punta se aproxima al tamaño de un solo átomo. En la operación, la sonda se mueve a lo largo de la superficie del espécimen a una distancia de sólo un nanómetro o menos, y se mide cualquiera de las varias propiedades de la superficie, dependiendo del microscopio de sonda exploratoria. El ***microscopio de túnel exploratorio*** (STM, por sus siglas en inglés) fue el primer instrumento de sonda exploratoria en inventarse. Mide la cantidad de corriente que fluye entre la superficie y la punta de la sonda hecha de tungsteno. Se llama un instrumento de túnel porque su operación se basa en un fenómeno de mecánica cuántica conocido como formación de ***túnel***, en el que los electrones individuales en un material sólido pueden saltar más allá de la superficie del sólido hacia el espacio. La probabilidad de que los electrones estén en este espacio más allá de la superficie decrece exponencialmente en proporción a la distancia de la superficie. Esta sensibilidad a la distancia se explota en el STM al posicionar la punta de la sonda muy cerca de la superficie y aplicar un pequeño voltaje entre las dos. Esto ocasiona que los electrones de los átomos superficiales sean atraídos hacia la pequeña carga positiva de la punta, y éstos salten a través del vacío hacia la sonda. Conforme la sonda se mueve a lo largo de la superficie, ocurren variaciones en la corriente resultante debido a las posiciones de los átomos individuales sobre la superficie, y estas variaciones proporcionan datos para construir una imagen topográfica de la superficie.

Otros tipos de microscopios de sonda exploratoria incluyen el microscopio de fuerza atómica y el microscopio de fuerza magnética. El ***microscopio de fuerza atómica*** (AFM, por sus siglas en inglés) utiliza una sonda unida a un voladizo delicado que se dobla debido a la fuerza ejercida por la superficie en la sonda mientras atraviesa la superficie del espécimen. La deflexión vertical de la sonda se mide en forma óptica, con base en el patrón de interferencia de un rayo ligero o la reflexión de un rayo láser en el voladizo. En la figura 38.1 se muestra una imagen generada por un AFM. El ***microscopio de fuerza magnética*** (MFM, por sus siglas en inglés) usa una sonda magnética cuya punta es sensible a las fuerzas magnéticas de los átomos en la superficie del espécimen. Su principio de operación es similar a la de la cabeza lectora en un reproductor de audiocasetes o una unidad de disco duro.

38.1.3 Buckybolas y nanotubos de carbono

Dos estructuras interesantes en la nanotecnología son las buckybolas y los nanotubos. El nombre ***buckybolas*** se refiere a la molécula C_{60}, una molécula que contiene exactamente 60 átomos de carbono y que tiene una forma parecida a una pelota de futbol soccer, como en la figura 38.2. Los 60 átomos están dispuestos simétricamente en 12 caras pentagonales y 20 caras hexagonales para formar una bola. Estas pelotas moleculares pueden unirse mediante fuerzas de van der Waals (sección 2.2) para formar cristales cuya estructura reticular es cúbica centrada en la cara [figura 2.8*b*), sección 2.3.1]. La separación entre cualquier molécula y su vecino más cercano en la estructura reticular del C_{60} es de 1 nm. El nombre original de las moléculas individuales fue buckminsterfullereno, en honor al arquitecto/inventor R. Buckminister Fuller, quien diseñó el domo geodésico que se parece a la estructura del C_{60}. En la actualidad, el C_{60} se llama simplemente ***fullerenos***, que se refiere a

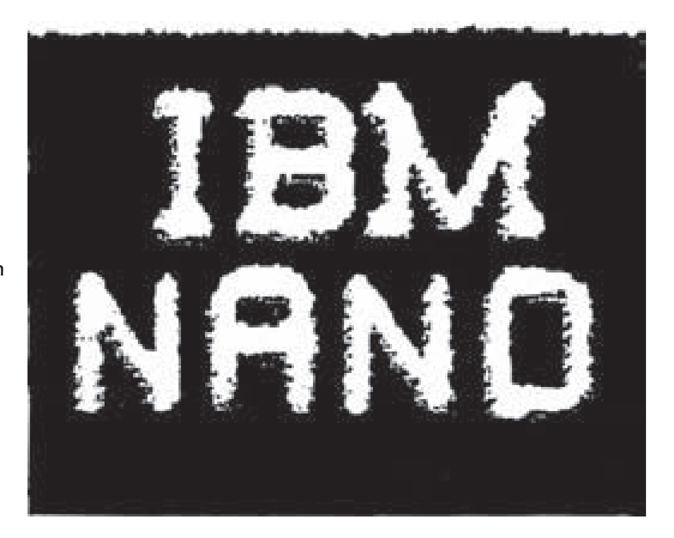


FIGURA 38.1 Una imagen de un microscopio de fuerza atómica de letras de dióxido de silicio sobre un sustrato de silicio. Las líneas de óxido de las letras tienen una anchura de alrededor de 20 nm. (Imagen cortesía de IBM Corporation).

cualquier molécula de carbono hueca y cerrada que consiste en 12 caras pentagonales y diferentes números de caras hexagonales.

Los fullerenos son interesantes por varias razones. Por ejemplo, sus propiedades eléctricas y la capacidad de alterar estas propiedades. Un cristal de C_{60} tiene las propiedades de un aislante. Sin embargo, cuando se dopa con un metal alcalino como el potasio (para formar K_3C_{60}), se transforma en un conductor eléctrico. Aún más, presenta propiedades de un superconductor a temperaturas de alrededor de 18 K. Otra área de aplicación potencial para los fullerenos de C_{60} surge debido a que poseen muchos puntos de conexión posible para medicamentos, lo cual puede permitirles usarse en el tratamiento y la terapia médica.

Los ***nanotubos de carbono*** son otra estructura molecular que consiste en átomos de carbono adheridos en la forma de un tubo largo. Los átomos pueden disponerse en una serie de configuraciones alternativas, tres de las cuales se muestran en la figura 38.3. Todos los nanotubos que se muestran en la figura tienen sólo una pared (SWNT, por sus siglas en inglés), pero también pueden fabricarse estructuras con paredes múltiples (MWNT, por

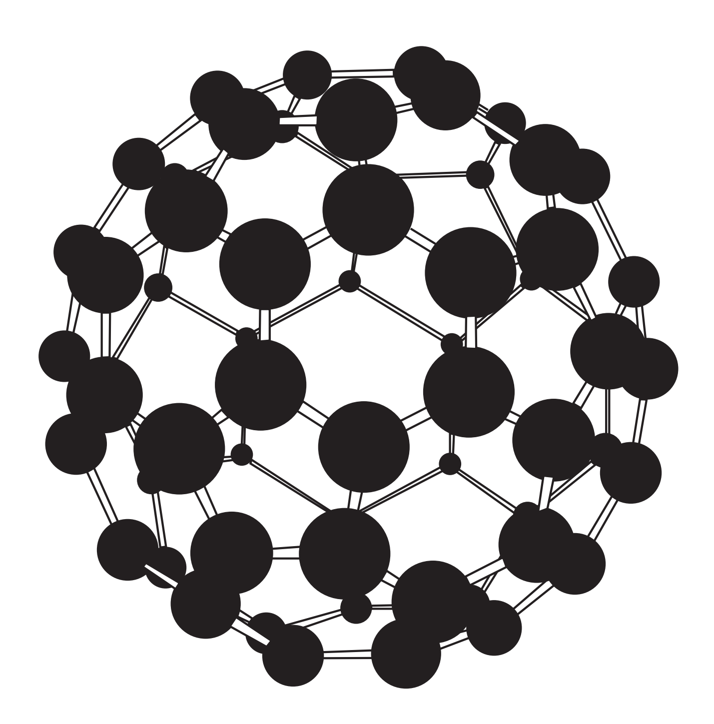


FIGURA 38.2 Estructura de la molécula de C_{60}. (Reimpreso con permiso de [14]).

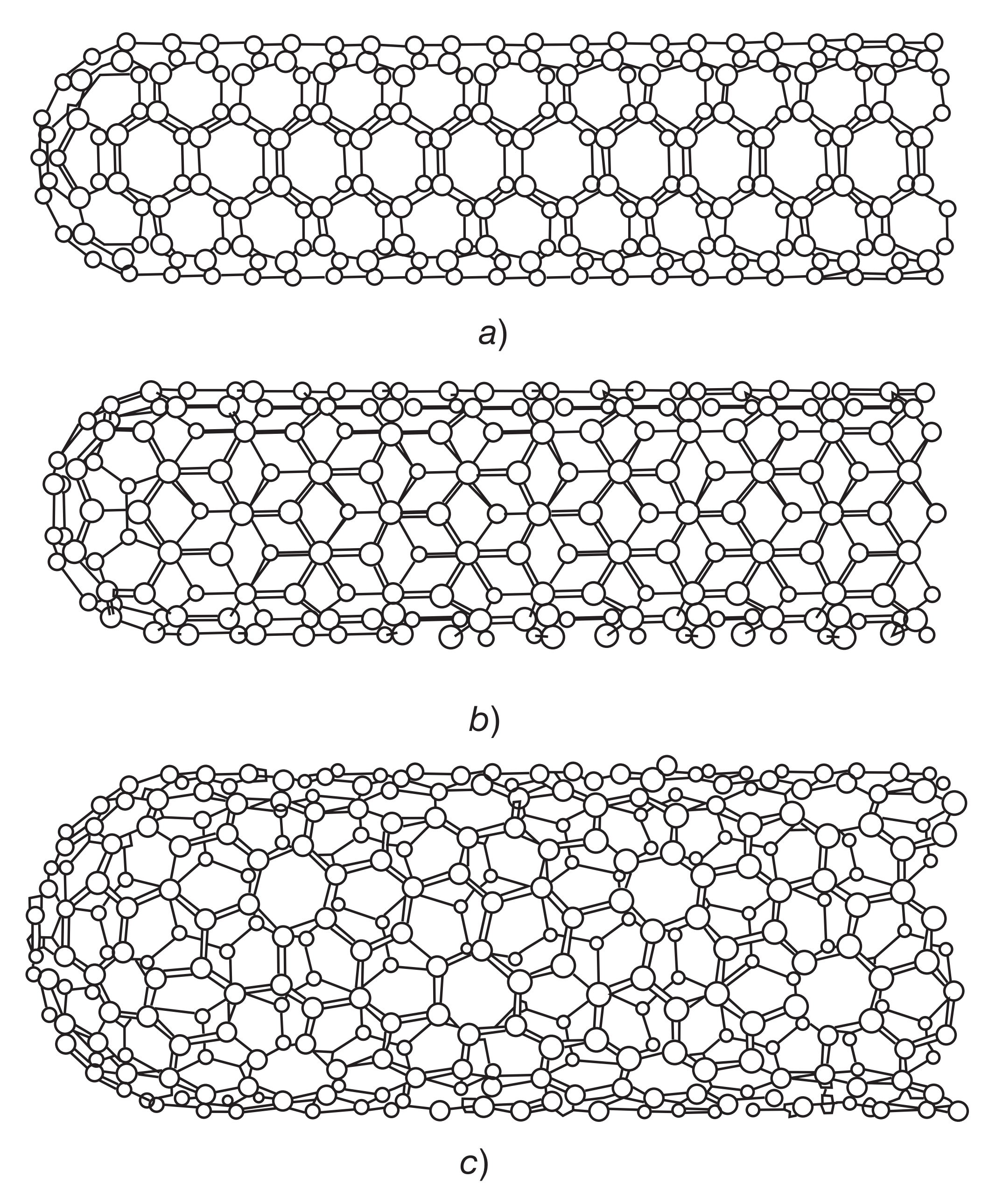


FIGURA 38.3 Varias estructuras posibles de los nanotubos de carbono: *a*) brazo de silla, *b*) zigzag, *c*) chiral. (Reimpreso con permiso de [14]).

sus siglas en inglés), los cuales son tubos dentro de un tubo. Un SWNT tiene un diámetro típico de unos cuantos nanómetros y una longitud de alrededor de 100 nm, y está cerrado en ambos extremos.

Las propiedades eléctricas de los nanotubos son poco usuales. Dependiendo de su estructura y diámetro, los nanotubos pueden tener propiedades metálicas (conductores) o semiconductores. La conductividad de los nanotubos metálicos es superior al cobre en algunos aspectos. La explicación para esto es que los nanotubos contienen muy pocos de los defectos que existen en los metales, los cuales tienden a dispersar los electrones, con lo que se incrementa la resistencia eléctrica. Como los nanotubos tienen una resistencia tan baja, las corrientes altas no incrementan su temperatura en la forma que lo hacen los metales bajo las mismas cargas eléctricas. La conductividad térmica de los nanotubos metálicos también es muy alta. Estas propiedades eléctricas y térmicas resultan muy interesantes para los fabricantes de computadoras y circuitos integrados porque podrían permitir velocidades de reloj mayores en los procesadores sin los problemas de acumulación progresiva

de calor encontrados en la actualidad conforme se incrementa la densidad de los componentes en un chip de silicio. Pueden lograrse velocidades de reloj hasta 10^4 veces más rápidas que los procesadores actuales [14], junto con densidades mucho más altas.

Otra importante propiedad de los nanotubos de carbono es la emisión de campo, en el cual se emiten electrones desde los extremos de los tubos a velocidades muy altas cuando se aplica un campo eléctrico paralelo al eje de un nanotubo. Las posibles aplicaciones comerciales de la propiedad de emisión de campo en los nanotubos incluyen pantallas de panel plano para televisiones y monitores de computadora.

Las propiedades mecánicas constituyen otra razón del interés en los nanotubos. El módulo de elasticidad (rigidez) de los nanotubos de carbono es casi 10 veces el módulo del acero. Aún más, cuando se doblan muestran una gran resiliencia para regresar a su forma original sin ningún daño. La resistencia a la tensión también es muy alta para los nanotubos de carbono de una sola pared, con valores típicos alrededor de 20 veces más grandes que los del acero. Estas propiedades mecánicas proporcionan oportunidades para usar los nanotubos como materiales de refuerzo en compuestos de matriz de polímeros (sección 9.4). Irónicamente, los nanotubos con varias paredes no son tan fuertes.

38.2 PROCESOS DE NANOFABRICACIÓN

Los procesos de fabricación para los materiales y estructuras a escala nanométrica pueden dividirse en dos categorías básicas:

1. ***Enfoques descendentes***, los cuales adaptan las técnicas de microfabricación analizadas en el capítulo anterior para los objetos con tamaños a nanoescala.
2. ***Enfoques ascendentes***, en los que se manipulan y combinan átomos y moléculas en estructuras más grandes.

La organización de esta sección se basa en estos dos enfoques. Como los métodos de procesamiento asociados con los enfoques descendentes ya se analizaron en dos capítulos anteriores (capítulo 35 en circuitos integrados y capítulo 37 en microfabricación), el estudio de la sección 38.2.1 enfatizará cómo deben modificarse estos procesos para la nanoescala. En la sección 38.2.2 se analizan los enfoques ascendentes, que quizá son más interesantes aquí debido a su unicidad y relevancia especial para la nanotecnología.

38.2.1 Enfoques de procesamiento descendente

Los enfoques descendentes para fabricar objetos a nanoescala implican el procesamiento de materiales en volumen (por ejemplo, obleas de silicio) y películas delgadas usando técnicas litográficas como las usadas en la fabricación de circuitos integrados y microsistemas. Los enfoques descendentes también incluyen otras técnicas de maquinado de precisión (sección 37.2.3) que se han adaptado para hacer nanoestructuras.

Conforme los tamaños característicos de los componentes en un circuito integrado (CI) se vuelven más y más pequeños, las técnicas de fabricación basadas en litografía óptica se ven limitadas por las longitudes de onda de la luz visible. En la actualidad se usa luz ultravioleta para fabricar los CI porque sus longitudes de onda más cortas permiten fabricar elementos más pequeños, lo que a su vez permite densidades de componentes más altas en el CI. La tecnología que en la actualidad se perfecciona para la fabricación de CI se llama litografía ultravioleta extrema (EUV, sección 35.3.2). Utiliza luz UV con una longitud de onda de hasta 13 nm, lo cual de hecho cae dentro del rango de la nanotecnología. Sin embargo, cuando se usa la litografía EUV con estas longitudes de onda UV muy cortas pueden surgir ciertos problemas técnicos. Los problemas incluyen: 1) deben crearse nuevos materiales fotorresistentes que sean sensibles a estas longitudes de onda, 2) los sistemas de

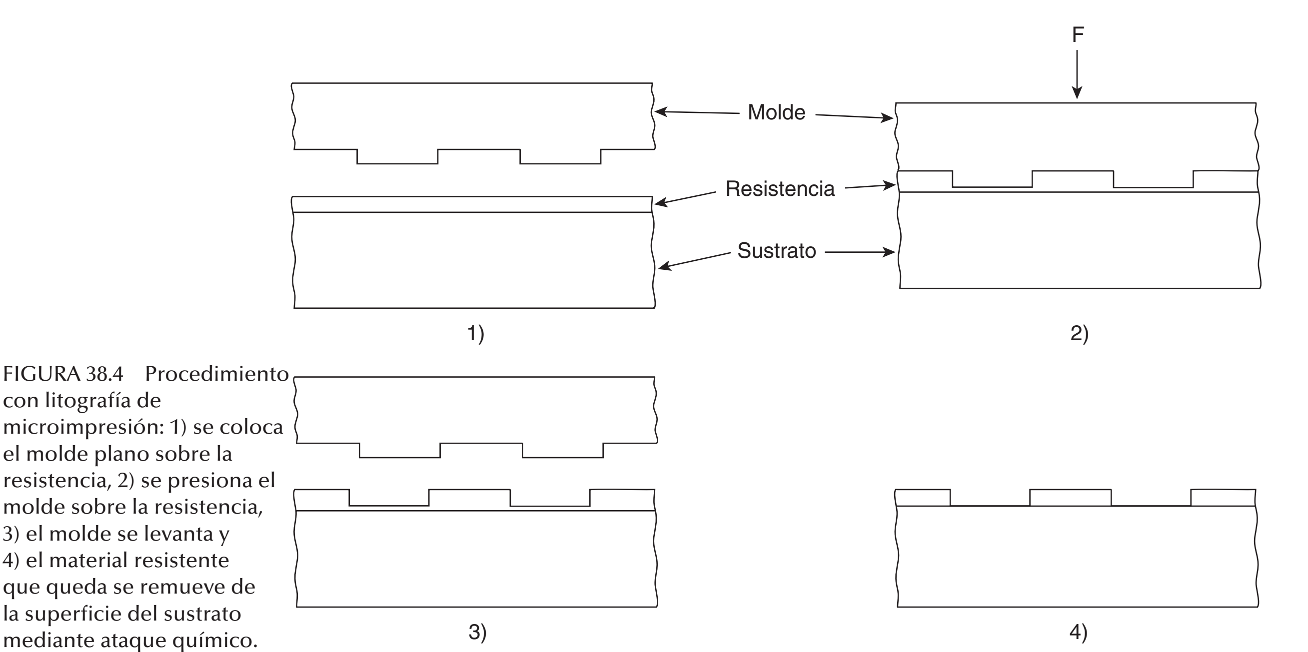


FIGURA 38.4 Procedimiento con litografía de microimpresión: 1) se coloca el molde plano sobre la resistencia, 2) se presiona el molde sobre la resistencia, 3) el molde se levanta y 4) el material resistente que queda se remueve de la superficie del sustrato mediante ataque químico.

enfoque deben basarse en todas las ópticas reflexivas y 3) deben usarse fuentes de plasma basadas en irradiación de láser del elemento xenón [11].

Existen otras técnicas de litografía que pueden usarse en la fabricación de estructuras a nanoescala. Entre éstas se incluye la litografía con haz de electrones, la litografía con rayos X y la litografía con micro y nanoimpresión. La litografía con haz de electrones y con rayos X se analiza en el contexto del procesamiento de circuitos integrados en la sección 35.3.2. La ***litografía con haz de electrones*** funciona al dirigir un haz de electrones muy enfocado a lo largo del patrón deseado en la superficie del material, exponiendo de esta manera las áreas superficiales usando un proceso secuencial sin la necesidad de una mascarilla. Aunque la litografía con haz de electrones es capaz de resoluciones del orden de los 10 nm, su operación secuencial la hace relativamente lenta en comparación con las técnicas de enmascarado y por ende no es conveniente para la producción en masa. La ***litografía con rayos X*** puede producir patrones con resoluciones de alrededor de 20 nm, y utiliza técnicas de enmascarado, con lo que es posible la alta producción. Sin embargo, los rayos X son difíciles de enfocar y requieren impresión por contacto o a proximidad (sección 35.3.1). Además, el equipo para aplicaciones de producción es costoso y los rayos X son peligrosos para las personas.

La ***litografía con microimpresión*** usa un molde plano con el patrón deseado sobre una cara (es decir, un estampado) que deforma físicamente la superficie de la resistencia para crear características microscópicas correspondientes a las regiones sobre la superficie del sustrato que se protegerán mientras que otras regiones se exponen. Puede usarse el mismo tipo de estampado plano en el modo de una impresión positiva, llamado ***impresión de microcontacto***, en el cual se transfiere un patrón de moléculas a una superficie de sustrato, muy parecido a como se transfiere tinta a una superficie de papel. La ***litografía con nanoimpresión*** y la ***impresión por nanocontacto*** son los mismos procesos básicos excepto porque las características del patrón tienen proporciones a nanoescala. En la figura 38.4 se ilustra la secuencia del proceso para la litografía con microimpresión. El patrón de molde se produce típicamente mediante litografía con haz de electrones. El patrón consiste de áreas altas y bajas; las áreas altas corresponden a regiones en la superficie de la resistencia que serán removidas para exponer el sustrato. El material resistente es un polímero termoplástico, el cual se suaviza mediante calor antes de presionar. Después, el molde se presiona sobre la capa de resistencia suavizada, hundiéndola hasta coincidir con las regiones elevadas del patrón de molde. Así, para la alteración de la capa de resistencia se usa deformación mecánica en vez de radiación electromagnética, como en los métodos de litografía más tradicionales.

Las regiones comprimidas de la capa resistente se remueven subsecuentemente mediante ataque químico anisotrópico (sección 35.4.5). El proceso de ataque químico también reduce el espesor de la capa resistente que queda, pero permanece la suficiente para proteger el sustrato del procesamiento subsecuente. La litografía con micro y nanoimpresión puede prepararse para altas velocidades de producción a un costo modesto. La litografía con nanoimpresión puede producir resoluciones de patrón de 10 nm. En el procedimiento de impresión no se requiere una mascarilla, aunque el molde necesita una preparación análoga.

38.2.2 Enfoques de procesamiento ascendente

En los enfoques ascendentes, los materiales iniciales son átomos, moléculas e iones. Los procesos unen entre sí a la mayoría de estos bloques de construcción, en algunos casos uno por uno, para fabricar la entidad a nanoescala deseada. Esta sección se divide en tres técnicas que han recibido una atención considerable en la literatura de nanotecnología: 1) nanofabricación mediante técnicas de sonda exploratoria, 2) producción de nanotubos de carbono y 3) autoensamble.

Nanofabricación mediante técnicas de sonda exploratoria En la sección 38.1.2 se describen las técnicas de microscopio de sonda exploratoria en el contexto de la medición y la "observación" de características y objetos a escala de nanómetros. Estos instrumentos usan una sonda de aguja muy aguda para explorar una superficie desde una distancia de alrededor de un nanómetro por encima de dicha superficie. En el caso del microscopio de túnel exploratorio (STM, por sus siglas en inglés), se aplica un voltaje a la sonda, lo que ocasiona que los electrones de la superficie salten hacia la punta de la sonda. Los electrones que saltan pueden medirse como una corriente eléctrica. Si la punta se mueve a través de la superficie a una elevación constante por encima de ésta, entonces la corriente será más alta en las ubicaciones inmediatamente por encima de los átomos superficiales y más baja en los puntos entre los átomos superficiales. De manera alternativa, si se permite que la elevación de la punta por encima de la superficie flote manteniendo una corriente constante, entonces puede medirse la deflexión vertical de la punta conforme atraviesa la superficie. Estas variaciones en la corriente o la deflexión pueden usarse para crear imágenes o planos topográficos de la superficie en una escala atómica o molecular.

El microscopio de túnel exploratorio también puede usarse para manipular átomos o moléculas individuales que se adhieren a una superficie de sustrato mediante las fuerzas de adsorción (uniones químicas débiles). En la figura 38.5a) se ilustra la variación en la corriente o la deflexión de la punta de una sonda de STM conforme se mueve a través de una superficie sobre la cual se localiza un átomo adsorbido. Conforme la punta se mueve sobre la superficie inmediatamente por encima del átomo adsorbido, existe un incremento en la señal. Aunque la fuerza de unión que atrae el átomo a la superficie es débil, es significativamente más grande que la fuerza de atracción creada por la punta, simplemente porque la distancia es más grande. Sin embargo, si la punta de la sonda se mueve lo suficientemente cerca del átomo adsorbido de manera que su fuerza de atracción sea más grande que la fuerza de adsorción, el átomo será arrastrado a lo largo de la superficie, como se sugiere en la figura 38.5b). De este modo, los átomos o moléculas individuales pueden manipularse para crear diferentes estructuras a nanoescala. Un ejemplo de STM notable logrado en los laboratorios de investigación de IBM fue la fabricación del logotipo de la compañía de átomos de xenón adsorbidos sobre una superficie de níquel en un área de 5 nm por 16 nm. Esta escala es considerablemente más pequeña que el letrero de la figura 38.1.

La manipulación de átomos individuales mediante STM y otras técnicas de sonda exploratoria pueden clasificarse como manipulación lateral y vertical. En la manipulación lateral, los átomos o moléculas se transfieren a lo largo de la superficie mediante fuerzas de atracción o repulsión ejercidas por la punta del STM. En la manipulación vertical, los átomos o moléculas se separan de la superficie y se depositan en una ubicación diferente para formar una estructura. Aunque este tipo de manipulación STM de átomos y moléculas tiene interés científico, existen limitaciones tecnológicas que inhiben su aplicación

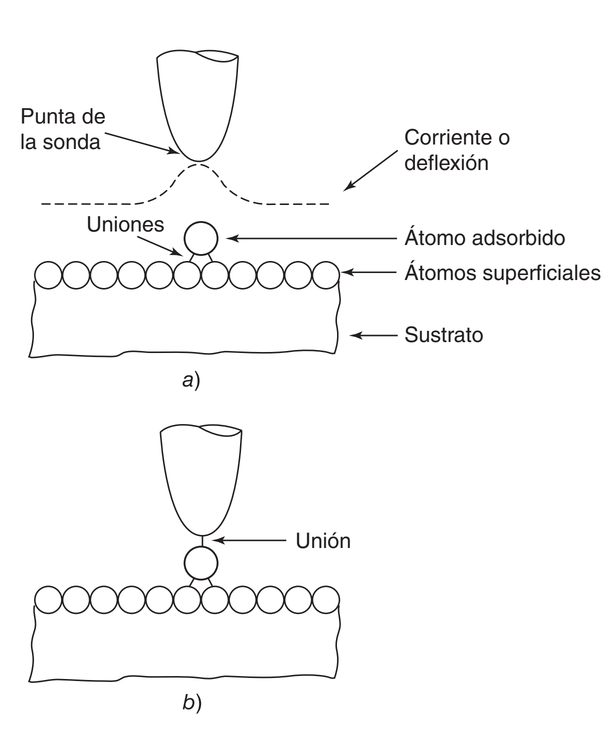


FIGURA 38.5 Manipulación de átomos individuales por medio de técnicas de microscopio de túnel exploratorio: *a*) la punta de la sonda se mantiene a una distancia de la superficie que es suficiente para evitar la distorsión del átomo adsorbido y *b*) la punta de la sonda se mueve más cerca de la superficie de manera que el átomo adsorbido es atraído hacia la punta.

comercial, al menos en la alta producción de productos nanotecnológicos. Una de las limitaciones es que debe llevarse a cabo en un ambiente al alto vacío para evitar que los átomos o moléculas perdidos interfieran con el proceso. Otra limitación es que la superficie del sustrato debe enfriarse a temperaturas cercanas al cero absoluto (−273 °C o −460 °F) para reducir la difusión térmica que gradualmente distorsionará la estructura atómica en formación. Estas limitaciones hacen que el proceso sea muy lento y costoso.

Otra técnica de sonda exploratoria, que resulta promisoria para las aplicaciones prácticas, se llama nanolitografía de pluma. En la ***nanolitografía de pluma*** (DPN, por sus siglas en inglés), se usa la punta de un microscopio de fuerza atómica para transferir moléculas hacia una superficie de sustrato por medio de un menisco solvente, como se muestra en la figura 38.6. El proceso es, de alguna manera, análogo a utilizar una pluma fuente antigua para transferir tinta a una superficie de papel mediante fuerzas capilares. En la DPN, la punta del AFM actúa como la punta de la pluma, y el sustrato se convierte en la superficie sobre la cual se depositan las moléculas disueltas (es decir, la tinta). Las moléculas depositadas deben tener una afinidad química para el material de sustrato, de la misma forma que la tinta se adhiere al papel. La DPN puede usarse para “escribir” patrones de moléculas sobre una superficie, donde los patrones tienen dimensiones por debajo de las micras. Se han reportado anchos de línea de entre 10 y 15 nm [20]. Además, la DPN puede usarse para depositar diferentes tipos de moléculas en ubicaciones diferentes sobre la superficie del sustrato.

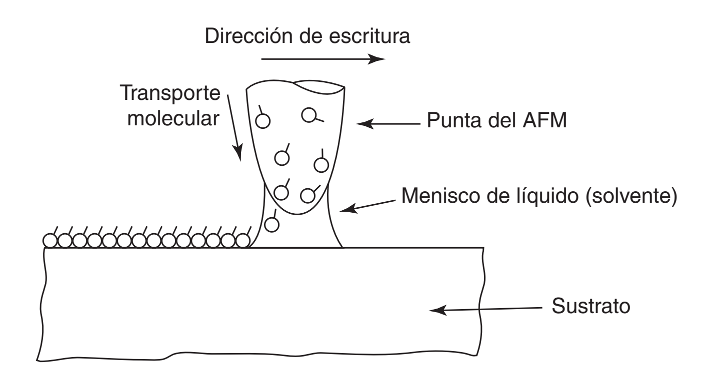


FIGURA 38.6 Nanolitografía de pluma, en la que la punta de un microscopio de fuerza atómica se usa para depositar moléculas a través del menisco líquido que se forma de manera natural entre la punta y el sustrato.

Producción de nanotubos de carbono Las propiedades destacables y las aplicaciones potenciales de los nanotubos de carbono se analizan en la sección 38.1.3. Los nanotubos de carbono pueden producirse mediante varias técnicas. En los siguientes párrafos se analizan tres de ellas: 1) evaporación láser, 2) técnicas de arco de carbono y 3) deposición química de vapor.

En el ***método de evaporación láser***, la materia prima inicial es una pieza de trabajo de grafito que contiene pequeñas cantidades de cobalto y níquel. Estas trazas de metal desempeñan el papel de catalizador, actuando como sitios de nucleación para la formación posterior de los nanotubos. El grafito se coloca en un tubo de cuarzo que se llena de gas argón y se calienta a 1200 °C (2200 °F). Se enfoca un rayo láser pulsado sobre la pieza de trabajo, lo que ocasiona que los átomos de carbono se evaporen de la masa de grafito. El argón desplaza los átomos de carbono fuera de la región de alta temperatura del tubo y dentro de un área donde se localiza un aparato de cobre con agua helada. Los átomos de carbono se condensan sobre el cobre frío; mientras lo hacen, forman nanotubos con diámetros de 10-20 nm y longitudes de alrededor de 100 μm.

La ***técnica de arco de carbono*** usa dos electrodos de carbono que tienen diámetros entre 5 y 20 μm y están separados por 1 mm. Los electrodos se localizan en un contenedor parcialmente evacuado (alrededor de 2/3 de una presión atmosférica) a través del cual fluye helio. Para iniciar el proceso, se aplica un voltaje de alrededor de 25 V a través de los dos electrodos, lo que ocasiona que se expulsen átomos de carbono del electrodo positivo y se transporten al electrodo negativo donde forman nanotubos. La estructura de los nanotubos depende de si se usa un catalizador. Si no es así, entonces se producen nanotubos con paredes múltiples. Si se colocan ciertas trazas de cobalto, hierro o níquel en el interior del electrodo positivo, entonces el proceso crea nanotubos con una sola pared, los cuales tienen de 1 a 5 nm de diámetro y alrededor de 1 μm de largo.

La deposición química de vapor (CVD) se describe en la sección 29.4. En el método de ***deposición química de vapor*** para producir nanotubos, el material de trabajo inicial es un gas hidrocarburo como el metano (CH_4) El gas se calienta a 1100 °C (2000 °F), con lo que se produce su descomposición y la liberación de átomos de carbono. Después los átomos se condensan sobre un sustrato frío para formar nanotubos con extremos abiertos en lugar de la característica de extremos cerrados de las otras técnicas de fabricación. El sustrato puede contener hierro u otros metales que actúan como catalizadores para el proceso. El catalizador metálico actúa como un sitio de nucleación para la creación del nanotubo, y también controla la orientación de la estructura. El proceso de CVD tiene la ventaja de que puede operarse en forma continua, lo que lo hace económicamente atractivo para la producción en masa.

Autoensamble Es un proceso fundamental en la naturaleza. La formación natural de una estructura cristalina durante el enfriamiento lento de minerales fundidos es un ejemplo de autoensamble sin vida. El crecimiento de los organismos vivientes es un ejemplo de autoensamble biológico. En ambos casos, ciertas entidades a nivel atómico y molecular se combinan entre sí para formar entidades más grandes; para ello actúan de un modo constructivo hacia la creación de alguna cosa deliberada. Si la cosa es un organismo viviente, las entidades intermedias son células biológicas, y el organismo crece a través de un proceso aditivo que presenta una replicación masiva de formaciones de células individuales, de tal manera que el resultado final es frecuentemente muy intrincado y complejo (por ejemplo, un ser humano).

Uno de los enfoques ascendentes en la nanotecnología involucra la emulación del proceso de autoensamble de la naturaleza para producir materiales y sistemas que tienen características o bloques de construcción a escala nanométrica, pero el producto final puede estar en una escala mayor que la nanoescala. Puede estar en la micro o macroescala, al menos para algunas de sus dimensiones. Entre las características deseables de los procesos atómicos o moleculares de autoensamble en nanotecnología están: 1) pueden realizarse rápidamente, 2) ocurren de manera automática y no requieren ningún control central,

3) presentan replicación masiva y 4) pueden realizarse bajo condiciones ambientales benignas (con presiones iguales o similares a la atmosférica y a temperatura ambiente). Es probable que el autoensamble sea el más importante de los procesos de nanofabricación debido a su bajo costo, su capacidad de producir estructuras en un rango amplio de tamaños (de la nanoescala a la macroescala) y su aplicabilidad general a una amplia variedad de productos [15].

Un principio subyacente al autoensamble es el principio de energía mínima. Las entidades físicas, como los átomos y las moléculas, buscan un estado tal que la energía total del sistema del cual forman parte se minimice. Este principio tiene las siguientes implicaciones para el autoensamble:

1. Debe haber algún mecanismo para el movimiento de las entidades (por ejemplo, átomos, moléculas, iones) en el sistema, lo que ocasiona que las entidades se acerquen entre sí. Entre los mecanismos posibles para este movimiento están la difusión, la convección en un fluido y los campos eléctricos.
2. Debe haber alguna forma de reconocimiento molecular entre las entidades. El reconocimiento molecular se refiere a la tendencia de una molécula (o átomo o ion) a ser atraída hacia otra molécula (o átomo o ion) para después unirse a ésta, por ejemplo, la manera en que el sodio y el cloro se atraen entre sí para formar la sal de mesa.
3. El reconocimiento molecular entre las entidades ocasiona que éstas se unan de tal forma que su ordenamiento físico logre un estado de energía mínima. El proceso de anexión involucra la unión química, usualmente los tipos secundarios más débiles (por ejemplo, las uniones de van der Waals).

En este libro se han encontrado varios casos de autoensamble molecular. A continuación se citarán dos ejemplos: 1) la formación de cristales y 2) la polimerización. La formación de cristales en metales, cerámicos y ciertos polímeros y elementos es una forma de autoensamble. Los boules crecientes de silicio en el proceso de Czochralski (sección 35.2.2) para la fabricación de circuitos integrados es una buena ilustración. Al usar cristal de semilla inicial, se forma silicio fundido muy puro dentro de un sólido cilíndrico grande cuya estructura reticular repetitiva coincide con la de la semilla a través de su volumen. El espaciado reticular en la estructura cristalina es de proporciones nanométricas, pero la replicación presenta órdenes de rango más grande.

Podría decirse que los polímeros son productos de autoensambles a escala nanométrica. El proceso de polimerización (sección 8.1.1) involucra la unión de monómeros individuales (moléculas individuales, como el etileno C_2H_4) para formar moléculas muy grandes (macromoléculas, como el polietileno), con frecuencia en la forma de una cadena larga con miles de unidades repetidas. Los copolímeros (sección 8.1.2) representan un proceso de autoensamble más complejo, en el cual se unen dos tipos diferentes de monómeros iniciales en una estructura repetitiva regular. Un ejemplo es el copolímero sintetizado del etileno y el propileno (C_3H_6). En estos ejemplos de polímeros, las unidades repetidas son de tamaño nanométrico, y se forman mediante un proceso de autoensamble masivo de materiales en masa que tienen un valor comercial importante.

La tecnología para producir boules de silicio y polímeros es anterior al interés científico actual en la nanotecnología. Las técnicas de fabricación de autoensamble son las de mayor relevancia en este capítulo y se han creado bajo la bandera de la nanotecnología. La mayoría de estos procesos de autoensamble aún están en la etapa de investigación y pueden dividirse en las siguientes categorías: 1) fabricación de objetos a nanoescala, incluidos moléculas, macromoléculas, conglomerados de moléculas, nanotubos y cristales; y 2) formación de arreglos bidimensionales como monocapas autoensambladas (películas superficiales que tienen una molécula de espesor) y redes de moléculas tridimensionales.

Algunos de los procesos en la categoría 1 ya se han analizado. Se considerará el autoensamble de películas superficiales como un ejemplo importante de la categoría 2. Las películas superficiales son recubrimientos bidimensionales formados sobre un sustrato sólido (tridimensional). La mayoría de las películas superficiales son inherentemente delgadas,

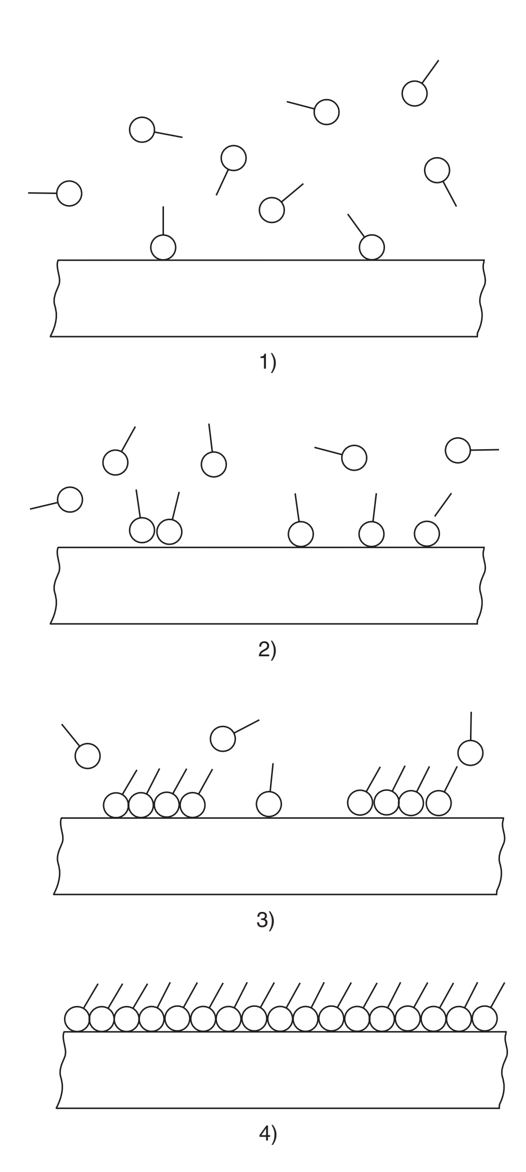


FIGURA 38.7 Secuencia típica en la formación de una monocapa de tiol sobre un sustrato de oro: 1) algunas de las moléculas de capa en movimiento por encima del sustrato son atraídas hacia la superficie, 2) se adsorben sobre la superficie, 3) forman islas, 4) las islas crecen hasta cubrir la superficie. (Con base en una figura de [7]).

aunque el espesor se mide típicamente en micrómetros o incluso milímetros (o fracciones de éstos), muy arriba de la escala de los nanómetros. Aquí resultan interesantes las películas superficiales cuyo espesor se mide en nanómetros. En la nanotecnología, también lo son las películas superficiales que se autoensamblan, tienen una molécula de espesor y donde las moléculas se organizan de alguna manera ordenada. Estos tipos de películas se denominan monocapas autoensambladas (SAM, por sus siglas en inglés). También son posibles estructuras con capas múltiples que poseen orden y tienen dos o más moléculas de espesor.

Los materiales de sustrato para monocapas y multicapas autoensambladas incluyen una variedad de metales y otros materiales inorgánicos. La lista incluye oro, plata, cobre, silicio y dióxido de silicio. Los metales nobles tienen la ventaja de no formar una película superficial de óxido que pudiera interferir con las reacciones que generan la capa deseada. Los materiales de capa incluyen tioles (una familia de compuestos orgánicos derivados del sulfuro de hidrógeno), sulfuros y disulfuros. Los materiales de capa deben ser capaces de ser adsorbidos sobre el material superficial. En la figura 38.7 se muestra la secuencia típica del proceso para la formación de una monocapa de tiol sobre oro. Las moléculas de capa se mueven libremente por encima de la superficie del sustrato y se adsorben sobre la superficie. Ocurre el contacto entre las moléculas adsorbidas en la superficie, y éstas forman una isla estable. Las islas se hacen más grandes y gradualmente se unen a través de

la adición de más moléculas en forma lateral sobre la superficie, hasta que el sustrato está completamente cubierto. La unión a la superficie de oro la da el átomo de azufre en el tiol, capa de sulfuro o disulfuro. En algunas aplicaciones, las monocapas autoensambladas pueden formarse en los patrones o regiones deseadas sobre la superficie del sustrato usando técnicas como la impresión de microcontacto y la nanolitografía de pluma.

38.3 LA NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE

En el año 2000, el Congreso de Estados Unidos promulgó una iniciativa nacional sobre nanotecnología con fondos por 400 millones de dólares y que iniciaría en 2001. Los niveles de los fondos se ha incrementado en lo que ahora se llama la National Nanotechnology Initiative (NNI). Se han asignado un total de 3 700 millones de dólares a lo largo de un periodo de cuatro años iniciando en 2005, por lo que éste es el programa de investigación y desarrollo con fondos federales más grande desde el programa espacial Apollo. El acta NNI ordenó la coordinación de las actividades de investigación y desarrollo en las diferentes agencias

TABLA 38.2 Las nueve áreas para el desarrollo de la nanotecnología identificadas en la National Nanotechnology Initiative (NNI).

Materiales nanoestructurados mediante diseño. El objetivo es crear materiales que sean más fuertes, más duros, más ligeros, más seguros y más eficientes; también construir materiales que posean características de autorreparación. La investigación se enfocará en 1) comprender las relaciones entre una nanoestructura del material y sus propiedades macroscópicas y 2) poner en práctica nuevos métodos de fabricación y medición.

Nanoelectrónica, optoelectrónica y magnética. Los objetivos incluyen la creación de dispositivos y tecnologías de fabricación nuevos en estas áreas para la integración en sistemas existentes y arquitecturas nuevas (por ejemplo, nuevas arquitecturas de circuitos para abordar los límites de las tendencias presentes en las tecnologías para la fabricación de circuitos integrados basados en silicio).

Cuidado de la salud, terapéutica y diagnóstico avanzados. Los objetivos son: 1) mejorar la salud de los humanos mediante la invención de nuevos biosensores y tecnologías de imágenes médicas, 2) crear dispositivos nanobasados que puedan usarse para dirigir la distribución de medicamentos a sitios determinados en el cuerpo humano, 3) mejorar los implantes biológicos por medio del procesamiento a nanoescala de la interfaz del implante con el hueso, 4) inventar dispositivos basados en nanoescala para devolver la vista y la audición y 5) diseñar técnicas de diagnóstico mejoradas usando métodos de secuenciación de genes.

Procesos a nanoescala para mejorar el medio ambiente. Los objetivos son: 1) encontrar métodos nuevos para medir contaminantes con base en nanotecnología, 2) crear nuevas formas de remover contaminantes submicroscópicos del aire y el agua y 3) extender el conocimiento científico con respecto a los fenómenos nanoescalares que son importantes para mantener la calidad del ambiente y reducir las emisiones indeseables.

Conversión y almacenamiento de energía eficientes. Los objetivos incluyen desarrollar 1) fuentes de energía más eficientes usando catalizadores de nanocristal, 2) celdas solares más eficientes, 3) materiales fotoactivos eficientes para la conversión solar de materiales en combustibles y 4) fuentes de luz de alta eficiencia. Entre las actividades adicionales están la exploración del uso de nanotubos de carbono para el almacenamiento de alta densidad de hidrógeno y la mejora de la eficiencia de los intercambios de calor usando fluidos con partículas de nanocristal suspendidas.

Exploración e industrialización del espacio con micronaves. Los objetivos son: 1) reducir el tamaño de las naves espaciales en algún orden de magnitud, 2) utilizar el peso ligero y la alta resistencia de los materiales nanoestructurados para reducir el consumo de combustible, 3) permitir la toma de decisiones autónoma e incrementar el almacenamiento de datos por medio de la nanoelectrónica y la nanomagnética y 4) utilizar materiales de autorreparación para extender el alcance de la exploración espacial.

Dispositivos de bionanosensor para enfermedades contagiosas y detección de amenazas biológicas. Los objetivos incluyen: 1) mejorar la detección de y la respuesta a las amenazas de ataques químicos y biológicos y enfermedades humanas. 2) incrementar las capacidades humanas y mejorar la salud por medio de dispositivos a nanoescala e 3) investigar la compatibilidad entre materiales a nanoescala y el tejido vivo.

Aplicación al transporte seguro y económico. Entre los objetivos están la invención de: 1) modos de transporte más eficientes usando nanomateriales que son más ligeros y tienen tasas de falla más bajas, 2) materiales más durables para caminos y puentes, 3) materiales inteligentes y dispositivos capaces de detectar fallas inminentes y realizar procesos de autorreparación, 4) recubrimientos a nanoescala con propiedades de baja fricción y baja corrosión y 5) sensores de desempeño a nanoescala.

Seguridad nacional. El objetivo general es lograr la dominación militar a bajo costo y con pocos recursos humanos, y reducir los riesgos del personal involucrados en el combate. Entre las actividades de investigación y desarrollo están: 1) mejorar la superioridad de conocimiento incrementando la velocidad de procesador, la capacidad de almacenamiento, la velocidad de acceso, la tecnología de despliegue y la capacidad de comunicación, 2) uso de materiales con mejores propiedades para los sistemas militares y 3) tecnologías de sensor para proteger al personal en combate y mejorar sus capacidades de lucha.

Recopilado de [11].

federales que están involucradas en esta tecnología, incluidos los departamentos de Defense y Energy, la National Science Foundation, los National Institutes of Health, National Institute of Standards and Technology y la National Aeronautics and Space Administration. Además, el acta definía nueve áreas para el desarrollo de la nanotecnología (conocidas como los grandes retos de la NNI) que afectarán las vidas de casi todos los ciudadanos estadounidenses. En la tabla 38.2 se describen brevemente las nueve áreas del desarrollo de nanotecnología para proporcionar un buen panorama de las oportunidades futuras que se vislumbran para esta tecnología.

REFERENCIAS

[1] Baker, S. y Aston, A., "The Business of Nanotech", ***Business Week***, 14 de febrero de 2005, pp. 64-71.
[2] Balzani, V., Credi, A. y Venturi, M., ***Molecular Devices and Machines—A Journey into the Nano World***, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2003.
[3] Bashir, R., "Biologically Mediated Assembly of Artificial Nanostructures and Microstructures", capítulo 5 en ***Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology***, W. A. Goddard, III, D. W. Brenner, S. E. Lyshevski y G. J. Iafrate (eds.). CRC Press, Boca Raton, Fl., 2003.
[4] Chaiko, D. J., "Nanocomposite Manufacturing", ***Advanced Materials & Processes***, junio de 2003, pp. 44-46.
[5] Drexler, K. E., ***Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation***, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1992.
[6] Fujita, H. (ed.), ***Micromachines as Tools for Nanotechnology***, Springer-Verlag, Berlín, 2003.
[7] Kohler, M., y Fritsche, W., ***Nanotechnology: An Introduction to Nanostructuring Techniques***, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2004.
[8] Lyshevski, S. E., "Nano- and Micromachines in NEMS and MEMS", capítulo 23 en ***Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology***, W. A. Goddard, III, D. W. Brenner, S. E. Lyshevski, y G. J. Iafrate (eds.), CRC Press, Boca Raton, Fl., 2003, pp. 23-27.
[9] Meyyappan, M. y Srivastava, D., "Carbon Nanotubes", capítulo 18 en ***Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology***, W. A. Goddard, III, D. W. Brenner, S. E. Lyshevski, y G. J. Iafrate (eds.), CRC Press, Boca Raton, Fl., 2003, pp. 18-1 a 18-26.
[10] Morita, S., Wiesendanger, R. y Meyer, E. (eds.), ***Noncontact Atomic Force Microscopy***, Springer-Verlag, Berlín, 2002.
[11] National Research Council (NRC), ***Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies***, Committee on Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies, The National Academies Press, Washington, D. C., 2002.
[12] Nazarov, A. A. y Mulyukov, R. R., "Nanostructured Materials", capítulo 22 en ***Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology***, W. A. Goddard, III. D. W. Brenner, S. E. Lyshevski, y G. J. Iafrate (eds.), CRC Press, Boca Raton, Fl., 2003. 22-1 a 22-41.
[13] Piner, R. D., Zhu, J., Xu, F., Hong, S., y Mirkin, C. A., "Dip-Pen Nanolithography", ***Science***, vol. 283, 29 de enero de 1999, pp. 661-663.
[14] Poole, Jr., C. P. y Owens, F. J., ***Introduction to Nanotechnology***, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N.J., 2003.
[15] Ratner, M. y Ratner. D., ***Nanotechnology: A Gentle Introduction to the Next Big Idea***, Prentice Hall PTR, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, N.J., 2003.
[16] Rietman. E. A., ***Molecular Engineering of Nanosystems***, Springer-Verlag, Berlín, 2000.
[17] Schmid, G. (ed.), ***Nanoparticles: From Theory to Application***, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, 2004.
[18] Torres, C. M. S. (ed.), ***Alternative Lithography: Unleashing the Potentials of Nanotechnology***, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Nueva York, 2003.
[19] Weber, A., "Nanotech: Small Products, Big Potential", ***Assembly***, febrero de 2004, pp. 54-59.
[20] Sitio web: www.chem.northwestern.edu/mkngrp/dpn.
[21] Sitio web: www.research.ibm.com/nanscience.
[22] Sitio web: www.zurich.ibm.com/st/atomic_manipulation.

PREGUNTAS DE REPASO

38.1. ¿Cuál es el rango de los tamaños característicos para las entidades asociadas con la nanotecnología?
38.2. ¿Cuáles son las disciplinas científicas y técnicas asociadas con la nanociencia y la nanotecnología?
38.3. ¿Por qué la biología está tan estrechamente asociada con la nanociencia y la nanotecnología?
38.4. Identifique algunos de los productos presentes y futuros asociados con la nanotecnología.
38.5. El comportamiento de las estructuras a nanoescala es diferente de las estructuras a macroescala e incluso a microescala debido a dos factores que se mencionan en el texto. ¿Cuáles son estos dos factores?
38.6. ¿Qué es un instrumento de sonda exploratoria y por qué es tan importante en la nanociencia y la nanotecnología?
38.7 ¿Qué es la creación de un túnel, como se define en el microscopio de túnel exploratorio?

38.8. ¿Qué es una buckybola?
38.9. ¿Qué es un nanotubo de carbono?
38.10. ¿Cuáles son las dos categorías de los enfoques usados en la nanofabricación?
38.11. ¿Por qué no se usa la fotolitografía basada en luz visible en la nanotecnología?
38.12. ¿Cuáles son las técnicas de litografía usadas en la nanofabricación?
38.13. Describa brevemente la técnica de litografía con microimpresión.
38.14. ¿En qué es diferente la litografía con nanoimpresión de la litografía con microimpresión?
38.15. ¿Cuáles son las limitaciones de las técnicas de sonda exploratoria en la nanofabricación que inhiben su aplicación comercial?
38.16. ¿Qué es el autoensamble en la nanofabricación?
38.17. ¿Cuáles son las características deseables de los procesos de autoensamble atómicos o moleculares en la nanotecnología?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 20 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

38.1. La nanotecnología se refiere a la fabricación y aplicación de entidades cuyos tamaños característicos están en cuál de los siguientes rangos: *a*) 0.1 nm − 10 nm, *b*) 1 nm − 100 nm, o *c*) 100 nm − 1000 nm.

38.2. ¿A cuál de las siguientes opciones es equivalente un nanómetro? (dos respuestas correctas): *a*) 1×10^{-3} μm, *b*) 1×10^{-6} m, *c*) 1×10^{-9} m, y *d*) 1×10^{6} mm?

38.3. ¿Cuál de las siguientes entidades biológicas es la más grande?: *a*) clorofila, *b*) virus del resfriado, *c*) hemoglobina en la sangre o *d*) glóbulo rojo en la sangre.

38.4. La razón de la superficie sobre el volumen de un cubo con 1×10^{-6} m en cada borde es significativamente más grande que la relación de la superficie sobre el volumen de un cubo que tiene 1 m de lado: ¿*a*) verdadero o *b*) falso?

38.5. La proporción de las moléculas superficiales en relación con las moléculas internas es significativamente más grande para un cubo que tiene 1×10^{-6} m en cada borde que para un cubo con 1 m de lado: ¿*a*) cierto o *b*) falso?

38.6. ¿Cuál de los siguientes microscopios puede lograr la mayor amplificación? *a*) microscopio electrónico, *b*) microscopio óptico o *c*) microscopio de túnel exploratorio.

38.7. ¿Cuáles de las siguientes opciones son afirmaciones correctas acerca de las buckybolas? (tres mejores respuestas): *a*) contiene 60 átomos, *b*) contiene 100 átomos, *c*) contiene 600 átomos, *d*) es un átomo de carbono, *e*) es una molécula de carbono, *f*) tiene la forma de un balón de básquetbol, *g*) tiene la forma de un tubo, *h*) tiene la forma de un balón de voleibol.

38.8. ¿Cuáles de las siguientes opciones se consideran técnicas que caen en la categoría llamada enfoques descendentes para la nanofabricación? (tres mejores respuestas): *a*) evolución biológica, *b*) litografía con haz de electrones, *c*) litografía con microimpresión, *d*) técnicas de sonda exploratoria, *e*) autoensamble y *f*) litografía con rayos X.

38.9. ¿Cuáles de las siguientes opciones se consideran técnicas que caen en la categoría llamada enfoques ascendentes para la nanofabricación? (tres mejores respuestas): *a*) litografía con haz de electrones, *b*) litografía con ultravioleta extrema, *c*) deposición química de vapor para producir nanotubos de carbono, *d*) litografía con nanoimpresión, *e*) técnicas de sonda exploratoria, *f*) autoensamble y *g*) litografía con rayos X.

38.10. ¿Cuál de las siguientes técnicas y/o dispositivos emplea la nanolitografía de pluma?: *a*) microscopio de fuerza atómica, *b*) deposición química de vapor, *c*) litografía con haz de electrones, *d*) litografía de nanoimpresión o *e*) autoensamble.

38.11. El autoensamble es probablemente el más importante de los procesos de nanofabricación debido a su bajo costo, su capacidad para producir estructuras en un rango de tamaños (que va de la nanoescala a la macroescala) y su aplicabilidad general a una amplia variedad de productos: ¿*a*) verdadero o *b*) falso?

38.12. ¿Cuál de los siguientes es el espesor de una monocapa autoensamblada?: *a*) un micrómetro, *b*) un milímetro, *c*) una molécula, *d*) un nanómetro.

38.13. ¿Cuál de las siguientes opciones expresa el significado de NNI?: *a*) Nanoscience Naval Institute, *b*) Nanoscience Nonsense and Ignorance, *c*) National Nanotechnology Initiative o *d*) Nanotechnology News Identification.

Parte X
Sistemas de manufactura

39 CONTROL NUMÉRICO Y ROBÓTICA INDUSTRIAL

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En esta parte del libro se consideran varios tipos de sistemas de manufactura que se asocian comúnmente con los procesos de fabricación y ensamble analizados en los capítulos anteriores. Un ***sistema de manufactura*** puede definirse como una colección de equipo integrado y recursos humanos que realizan una o más operaciones de procesamiento y/o ensamble sobre un material de trabajo inicial, una pieza o un conjunto de piezas. El equipo integrado consiste en máquinas de producción, manejo de material y dispositivos de posicionamiento y sistemas computacionales. Los recursos humanos se necesitan a tiempo completo o tiempo parcial para mantener al equipo en funcionamiento. En la figura 39.1 se muestra la posición de los sistemas de manufactura en el sistema de producción grande. Como lo indica el diagrama, los sistemas de manufactura se encuentran en la fábrica y son los que realizan el trabajo de valor agregado sobre la pieza o producto.

Los sistemas de manufactura incluyen tanto sistemas automatizados como equipo operado en forma manual. La distinción entre las dos categorías no siempre está clara, porque muchos sistemas de manufactura involucran elementos de trabajo automatizado y manual (por ejemplo, una máquina herramienta que funciona en un ciclo de procesamiento semiautomático pero que en cada ciclo debe ser cargada y descargada por un trabajador humano). La cobertura de este texto incluye ambas categorías y está organizada en tres capítulos: el capítulo 39 sobre control numérico y robótica industrial, el capítulo 40 sobre tecnología de grupos y sistemas de manufactura flexible y el capítulo 41 sobre líneas de producción. En [5] puede encontrarse un análisis más detallado de estos temas.

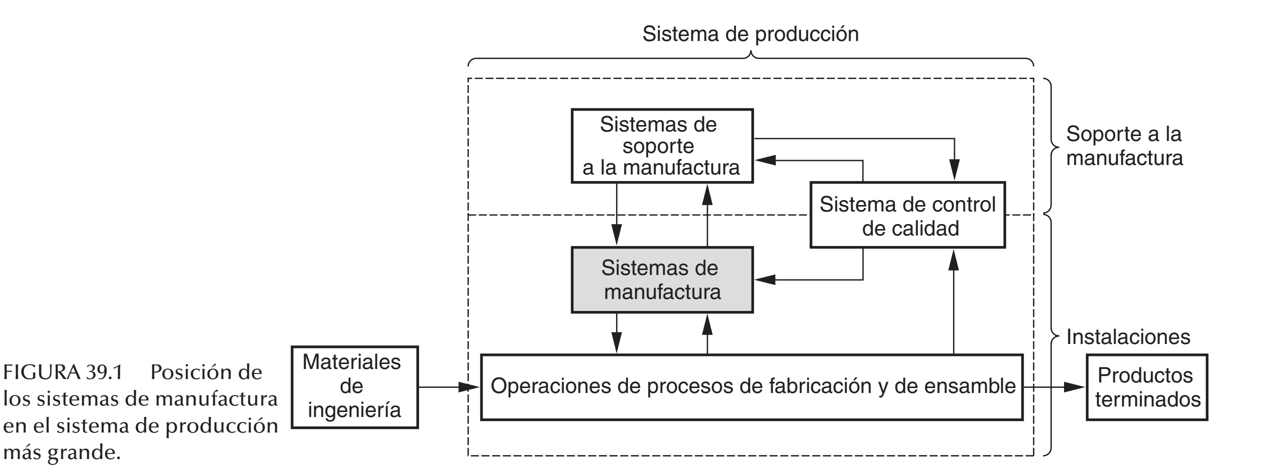


FIGURA 39.1 Posición de los sistemas de manufactura en el sistema de producción más grande.

39.1 CONTROL NUMÉRICO

El ***control numérico*** (CN) es una forma de automatización programable en la cual un programa que contiene datos alfanuméricos codificados controla las acciones de una parte del equipo. Los datos representan posiciones relativas entre una cabeza de trabajo y una pieza de trabajo. La cabeza de trabajo representa una herramienta u otro elemento de procesamiento y la pieza de trabajo es el objeto que se procesa. El principio operativo del CN es controlar el movimiento de la cabeza de trabajo en relación con la pieza de trabajo y la secuencia en la cual se realizan los movimientos. La primera aplicación del control numérico fue en el maquinado (histórica 39.1), y ésta es todavía un área de aplicación importante. En las figuras 22.26 y 22.27 se muestran máquinas herramienta de CN.

Nota histórica 39.1 *Control numérico* [3], [5].

Quienes reciben el crédito por las primeras investigaciones sobre control numérico son John Parsons y Frank Stulen en la Parsons Corporation en Michigan, a fines de la década de 1940. Parsons era un contratista de maquinado para la Fuerza Aérea de Estados Unidos y había diseñado un medio que utilizaba datos de coordenadas numéricas a fin de mover la mesa de trabajo de una fresadora y producir piezas complejas para aeronaves. Con base en el trabajo de Parsons, la Fuerza Aérea de Estados Unidos premió con un contrato a esta compañía en 1949, con el fin de estudiar la factibilidad del nuevo concepto de control para máquinas herramienta. El proyecto fue subcontratado para el laboratorio de servomecanismos en el Massachusetts Institute of Technology con el propósito de crear una máquina herramienta prototipo que utilizara el nuevo principio de datos numéricos. El laboratorio del M.I.T. confirmó que el concepto era factible y procedió a adaptar una fresadora vertical de tres ejes, usando controles combinados analógicos-digitales. El sistema mediante el cual se realizaban los movimientos de la máquina herramienta recibió el nombre de control numérico (CN). El funcionamiento de la máquina prototipo se demostró en 1952.

La exactitud y la repetibilidad del sistema de control numérico eran mucho mejores que los métodos de maquinado manual disponibles entonces. También era evidente el potencial para reducir el tiempo no productivo en el ciclo de maquinado. Sin embargo, los constructores de máquinas herramienta no estaban dispuestos a invertir las grandes cantidades requeridas para elaborar productos basados en el control numérico. En 1956, la fuerza aérea decidió patrocinar el desarrollo de máquinas herramienta de CN en diversas compañías. Estas máquinas se pusieron en operación en diferentes compañías aéreas entre 1958 y 1960. Pronto fueron evidentes las ventajas del CN y las compañías de la industria aeronáutica y aeroespacial

empezaron a hacer pedidos de nuevas máquinas de control numérico. Algunos, incluso, iniciaron la construcción de sus propias unidades.

La importancia de la programación de piezas fue clara desde el principio. La Fuerza Aérea de Estados Unidos siguió apoyando el desarrollo y la aplicación del CN mediante el patrocinio de la investigación en el M.I.T para un lenguaje de programación de piezas, cuyo propósito era controlar las máquinas de CN. Esta investigación produjo la implantación en 1958 de la habilitación de herramientas programadas automáticamente (APT, por sus siglas en inglés). APT es un lenguaje de programación de piezas a través del cual un usuario describe las instrucciones de maquinado en enunciados simples parecidos al idioma inglés, y éstos están codificados de manera que el sistema de CN pueda leerlos.

39.1.1 Tecnología del control numérico

En esta sección se definirán los componentes de un sistema de control numérico y después se describirá el sistema de eje de coordenadas y los controles de movimiento.

Componentes de un sistema de CN Un sistema de control numérico tiene tres componentes básicos: 1) un programa de piezas, 2) una unidad de control de máquina y 3) el equipo de procesamiento. El **programa de piezas** (término que se usa comúnmente en la tecnología de máquinas herramienta) es el conjunto detallado de comandos que va a seguir el equipo de procesamiento. Cada comando especifica una posición o movimiento que realizará la cabeza de trabajo en relación con el objeto procesado. Una posición se define mediante sus coordenadas *x-y-z*. En las aplicaciones de máquinas herramienta, los detalles adicionales en el programa de CN incluyen la velocidad de rotación del eje, la dirección del eje, la velocidad de alimentación, las instrucciones de cambio de herramientas y otros comandos relacionados con la operación. Durante muchos años, los programas de piezas de CN se codificaron en cinta de papel perforada de una pulgada de ancho, usando un formato estándar que podía interpretar la unidad de control de la máquina. En la actualidad, en los talleres especializados modernos, la cinta perforada se ha sustituido por nuevas tecnologías de almacenamiento. Éstas incluyen cintas magnéticas y transferencia electrónica de programas de piezas de CN desde una computadora central.

En la tecnología moderna de CN, la ***unidad de control de máquina*** (MCU, por sus siglas en inglés) es una microcomputadora que almacena el programa y lo ejecuta, convirtiendo cada comando en acciones mediante el equipo de procesamiento, un comando a la vez. La MCU está constituida por el hardware y el software. El hardware está formado por la microcomputadora, los componentes para hacer interfaz con el equipo de procesamiento y ciertos elementos de control de retroalimentación. La MCU también incluye un lector de cinta, si los programas se cargan en la memoria de la computadora desde una cinta perforada. El software está formado por el software de control del sistema, los algoritmos de cálculo y el software de traducción que convierten el programa de piezas de CN en un formato que pueda utilizar la MCU. Ésta también permite editar el programa de piezas, en caso que éste contenga errores o se requieran cambios en las condiciones del corte. Debido a que la MCU es una computadora, se usa el término ***control numérico por computadora*** (CNC) para diferenciar este tipo de CN de las tecnologías que le precedieron, las cuales se basaban por completo en dispositivos electrónicos incorporados.

El ***equipo de procesamiento*** realiza una secuencia de pasos para transformar la pieza de trabajo inicial en una pieza terminada, y funciona bajo el control de la unidad de control de máquina de acuerdo con el conjunto de instrucciones que contiene el programa de piezas. En la sección 39.1.5, se analizarán las diversas aplicaciones y equipos de procesamiento.

Sistema de coordenadas y control de movimientos en el CN Para especificar las posiciones en el control numérico se usa un sistema de ejes de coordenadas estándar. El sistema consiste en los tres ejes lineales (x, y, z) del sistema de coordenadas cartesianas, además de tres ejes rotatorios (a, b, c), como se muestra en la figura 39.2a). Los ejes rotatorios se usan

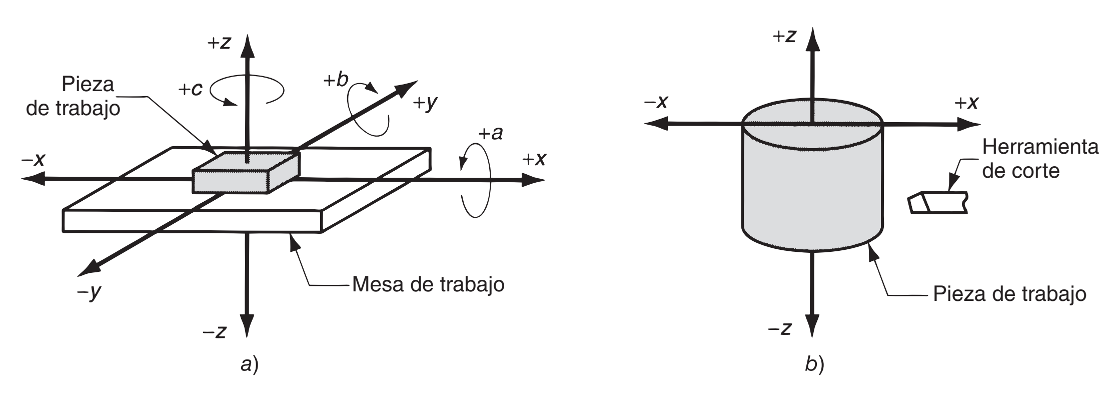


FIGURA 39.2 Sistema de coordenadas que se usa en el control numérico: *a*) para trabajo plano y prismático y *b*) para trabajo rotatorio.

para que la pieza de trabajo gire y presente diferentes superficies durante el maquinado, o para orientar la herramienta o cabeza de trabajo de algún ángulo en relación con la pieza. La mayoría de los sistemas de CN no requieren los seis ejes. Los sistemas de control numérico más sencillos (por ejemplo, los graficadores, las máquinas para procesar materia prima en prensa, como láminas metálicas planas y las máquinas de inserción de componentes) son sistemas de posicionamiento cuyas ubicaciones se definen en un plano *x-y*. La programación de estas máquinas implica especificar una secuencia de coordenadas *x-y*. En contraste, algunas máquinas herramienta tienen un control de cinco ejes para dar forma a configuraciones geométricas de piezas de trabajo complejas. Por lo general, estos sistemas incluyen tres ejes lineales y dos rotatorios.

Las coordenadas para un sistema de CN rotatorio se ilustran en la figura 39.2b). Estos sistemas están relacionados con operaciones de torneado en tornos de CN. Aunque el trabajo rota, éste no es uno de los ejes controlados. La trayectoria de corte de la herramienta de torno en relación con la pieza de trabajo está definida en el plano *x-z*, como se muestra en la figura.

En muchos sistemas de CN, los movimientos relativos entre el elemento de procesamiento y la pieza de trabajo se obtienen fijando la pieza a una mesa y después controlando las posiciones y los movimientos de ésta en relación con la cabeza de trabajo estacionaria o semiestacionaria. La mayoría de las máquinas herramienta sirve para insertar componentes y se basa en este método de operación. En otros sistemas, la pieza de trabajo se mantiene estacionaria y la cabeza de trabajo se mueve a lo largo de dos o tres ejes. Los cortadores por flama, las trazadoras o graficadores *x-y,* y las máquinas de medición de coordenadas funcionan de este modo.

Los sistemas de control de movimiento basados en el CN se dividen en dos tipos: 1) de punto a punto y 2) de trayectoria continua. Los ***sistemas de punto a punto,*** también llamados ***sistemas de posicionamiento***, mueven la cabeza de trabajo (o la pieza de trabajo) a una posición programada, sin considerar la trayectoria que recorren para llegar a tal lugar. Una vez terminado el movimiento, el cabezal de sujeción realiza cierta acción de procesamiento en una posición, tal como el taladrado o el perforado de un orificio. Por lo tanto, el programa consiste en una serie de posiciones de puntos en las cuales se realizan las operaciones.

Los ***sistemas de trayectoria continua*** proporcionan un dominio continuo y simultáneo de más de un eje, por lo que controlan la trayectoria que sigue la herramienta en relación con la pieza. Esto permite que la herramienta ejecute un proceso mientras se mueven los ejes y habilita al sistema para generar superficies angulares, curvas en dos dimensiones o contornos tridimensionales en la pieza de trabajo. Este esquema de operación se requiere en máquinas de dibujo, operaciones de fresado y torneado y corte con flama. En el maquinado, el control de trayectoria continua también recibe el nombre de ***torneado de contornos.***

Otro aspecto del control del movimiento se refiere a las posiciones en el sistema de coordenadas, las cuales se definen en forma absoluta o incremental. En el ***posicionamiento***

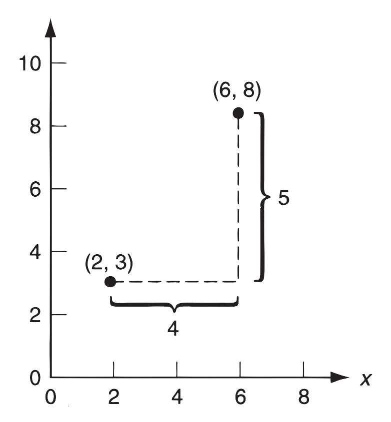


FIGURA 39.3 Posicionamiento absoluto contra posicionamiento incremental. En este momento la cabeza de trabajo está en el punto (2, 3) y se moverá al punto (6, 8). En el posicionamiento absoluto, el movimiento se especifica mediante $x = 6$, $y = 8$; mientras que en el posicionamiento incremental, el movimiento se especifica mediante $x = 4$, $y = 5$.

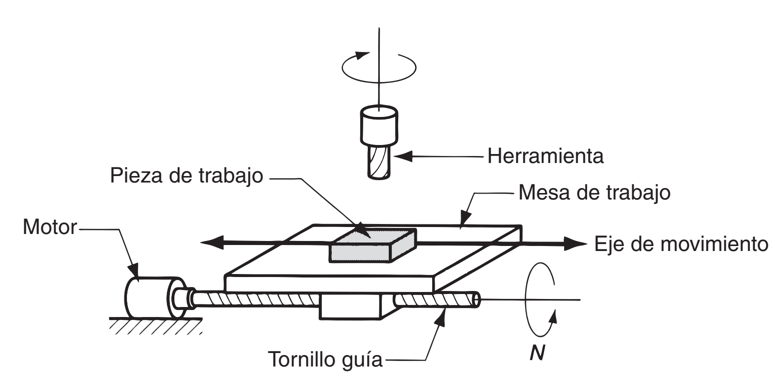
absoluto, las posiciones de la cabeza de trabajo siempre se definen respecto al origen del sistema de coordenadas. En el ***posicionamiento incremental,*** la siguiente disposición de la cabeza de trabajo se define de acuerdo con la posición actual. La diferencia se ilustra en la figura 39.3.

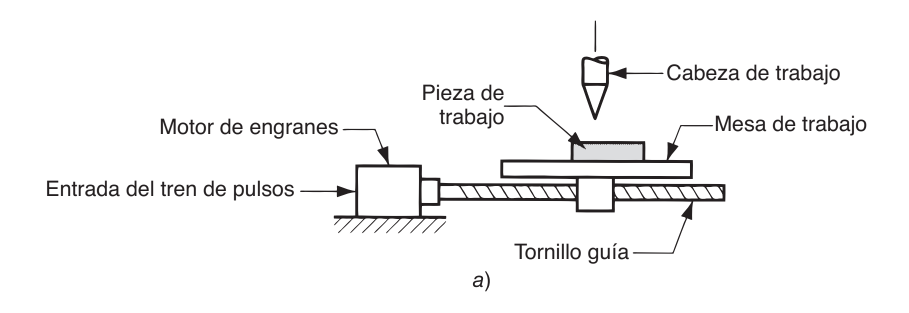
39.1.2 Análisis de los sistemas de posicionamiento para el CN

La función del sistema de posicionamiento es convertir las coordenadas que se especifican en el programa de piezas del CN en posiciones relativas entre la herramienta y la pieza de trabajo durante el procesamiento. En la figura 39.4 se muestra cómo funcionaría un sistema de posicionamiento simple. El sistema consiste en una mesa de trabajo, en la cual la pieza de trabajo está fija. El propósito de la mesa es mover la parte respecto a una herramienta o cabezal de sujeción. Para conseguir este propósito la mesa de trabajo se mueve en forma lineal mediante un tornillo guía rotatorio, el cual se controla por medio de un motor (por ejemplo, un motor de engranes o servomotor). Por cuestiones de simplicidad, sólo se muestra un eje en el diagrama. Para aportar la capacidad de desplazamiento sobre los ejes *x*-*y*, el sistema mostrado se construiría encima de un segundo eje perpendicular al primero. El tornillo guía tiene un cierto paso *p*, mm/rosca (in/rosca) o mm/rev (in/rev). Por lo tanto, la mesa se mueve una distancia igual al paso del tornillo guía con cada revolución. La velocidad a la que se mueve la mesa de trabajo, correspondiente a la velocidad de alimentación en la operación de maquinado, se determina mediante la velocidad de rotación del tornillo guía.

En los sistemas de CN se utilizan dos tipos básicos de control de movimientos: *a*) de ciclo abierto y *b*) de ciclo cerrado, como se muestra en la figura 39.5. La diferencia es que un sistema de ciclo abierto funciona sin verificar la posición adecuada para la mesa de trabajo. Un sistema de control de ciclo cerrado usa una medición retroalimentada para verificar que la posición de la mesa de trabajo sea en verdad la que está especificada en el programa. Los sistemas de ciclo abierto son menos costosos que los de ciclo cerrado y

FIGURA 39.4 Arreglo de motor y tornillo guía en un sistema de posicionamiento por CN.





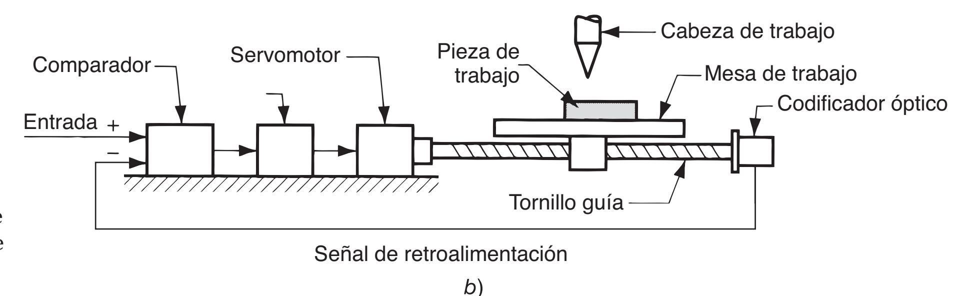


FIGURA 39.5 Dos tipos de movimientos bajo CN: *a*) de ciclo abierto y *b*) de ciclo cerrado.

son convenientes donde la fuerza que resiste el movimiento de funcionamiento es mínima. Los sistemas de ciclo cerrado generalmente se especifican para máquinas herramienta que ejecutan operaciones de trayectoria continua, como fresado o torneado, en los cuales las fuerzas de resistencia pueden ser significativas.

Sistemas de posicionamiento de ciclo abierto Es común que un sistema de posicionamiento de ciclo abierto use un motor de engranes para hacer girar el tornillo guía. En el CN se controla un motor de engranes mediante una serie de pulsos eléctricos que genera la unidad de control de máquina. Cada pulso provoca que el motor gire una fracción de una revolución, llamada ángulo de paso. Los ángulos de paso permisibles deben satisfacer la relación:

$$\alpha = \frac{360}{n_s} \tag{39.1}$$

donde α = ángulo de paso, grados; y n_s = cantidad de ángulos de paso para el motor, que debe ser un entero.

El ángulo a través del cual rota el tornillo guía, suponiendo una relación uno a uno entre engranes del motor y el tornillo guía, está dado por:

$$A = \alpha n_p \tag{39.2}$$

donde A = ángulo de rotación del tornillo guía, grados; n_p = cantidad de pulsos que recibe el motor; y α = ángulo de paso, definido aquí en grados/pulsos. Esta ecuación y las siguientes deben ajustarse para el caso en que una relación de engranes sea diferente de 1:1.

El movimiento resultante de la mesa como respuesta a la rotación del tornillo guía se determina a partir de:

$$x = \frac{pA}{360} \tag{39.3}$$

donde x = posición del eje x en relación con la posición inicial, mm (in); p = paso del tornillo guía, mm/rev (in/rev); y $A/360$ = la cantidad de revoluciones (y revoluciones parciales) del tornillo guía. Si se combinan las dos ecuaciones anteriores y se hace un reordenamiento, la cantidad de pulsos requeridos para obtener un incremento especificado de la posición x en un sistema punto a punto puede encontrarse mediante:

$$n_p = \frac{360x}{p\alpha} \tag{39.4}$$

Los pulsos se transmiten a cierta frecuencia, la cual conduce la mesa de trabajo a una velocidad correspondiente a la velocidad de alimentación en la dirección del eje del tornillo guía. La velocidad de rotación del tornillo guía depende de la frecuencia del tren de pulsos, como sigue:

$$N = \frac{60\,fp}{n_s} \qquad (39.5)$$

donde N = velocidad de rotación, rev/min; f_p = frecuencia del tren de pulsos, Hz (pulsos/s); y n_s = pasos/rev o pulsos/rev. Para una tabla de dos ejes con un control de trayectoria continuo, las velocidades relativas de los ejes se coordinan para obtener la dirección de viaje deseada.

La velocidad de viaje en la mesa, en la dirección del eje del tornillo guía, se determina mediante la velocidad de rotación del siguiente modo:

$$v_t = f_r = N_p \qquad (39.6)$$

donde v_t = velocidad de viaje de la mesa, mm/min (in/min); f_r = velocidad de alimentación en la mesa, mm/min (in/min); N = velocidad de rotación según se define en la ecuación anterior, rev/min; y p = paso del tornillo guía, mm/rev (in/rev).

La frecuencia requerida del tren de pulsos para controlar la mesa a una velocidad de alimentación especificada se obtiene mediante una combinación de las ecuaciones (39.5) y (39.6) y un reordenamiento para despejar f_p:

$$f_p = \frac{v_t n_s}{60p} = \frac{f_r n_s}{60p} \qquad (39.7)$$

EJEMPLO 39.1 Posicionamiento de ciclo abierto con CN

Un motor de engranes tiene 150 ángulos de paso. Su flecha de salida está acoplada directamente a un tornillo guía con un paso = 5.0 mm. Un tornillo guía conduce la mesa de trabajo de un sistema de posicionamiento. La mesa debe moverse una distancia de 75.0 mm desde su posición actual a una velocidad de viaje de 400 mm/min. Determine *a*) cuántos puntos se requieren para mover la mesa a la distancia especificada y *b*) la velocidad del motor y la razón de pulsos requeridos para alcanzar la velocidad deseada en la mesa.

Solución: *a*) Al reordenar la ecuación 39.3 para encontrar el ángulo A correspondiente a una distancia x = 75.0 mm,

$$A = \frac{360x}{p} = \frac{360(75)}{5} = 5400\Upsilon$$

Con 150 ángulos de paso, cada ángulo de paso es $\alpha = \frac{360}{150} = 2.4\Upsilon$. Por lo tanto, la cantidad de pulsos para mover la mesa 75 mm es $np = \frac{5\,400}{2.4} = 2\,250$ pulsos

b) Se usa la ecuación (39.6) para encontrar la velocidad de motor correspondiente a la velocidad de la mesa de 400 mm/min.

$$N = \frac{v_t}{p} = \frac{400}{5.0} = 80.0 \text{ rev / min}$$

y la velocidad de pulsos está dada por $fp = \frac{400(150)}{60(5.0)} = 200$ Hz ■

Sistemas de posicionamiento de ciclo cerrado Los sistemas de control numérico de ciclo cerrado, figura 39.5b), usan servomotores y mediciones de retroalimentación para asegurar que se obtiene la posición deseada. Un sensor de retroalimentación común en el control numérico (y también en robots industriales) es el codificador óptico, que se ilustra en la figura 39.6. El codificador óptico consiste en una fuente de luz, un fotodetector y

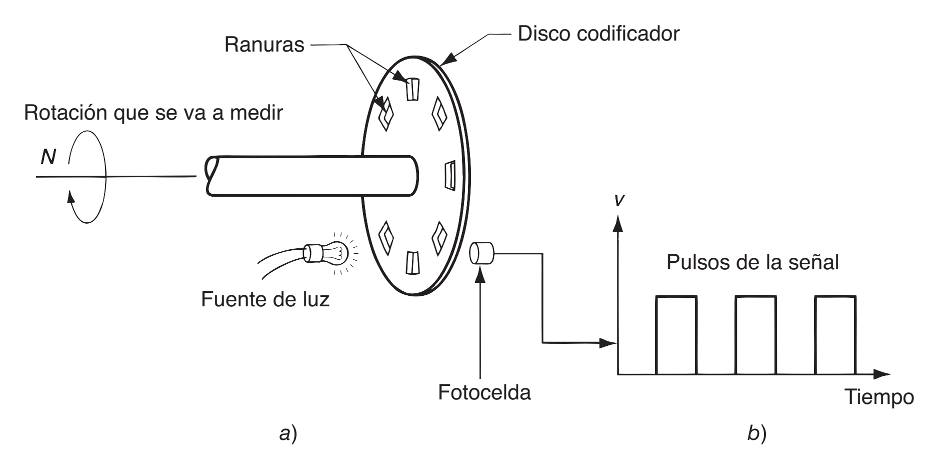


FIGURA 39.6 Codificador óptico: *a*) aparato y *b*) serie de pulsos emitido para medir la rotación del disco.

un disco que contiene una serie de ranuras a través de las cuales destella la fuente de luz para activar el fotodetector. Este disco se conecta, ya sea directamente o mediante un tren de engranaje, a una flecha rotatoria cuya posición y velocidad angulares se medirán. Conforme gira la flecha, las ranuras provocan que la fotocelda capte la fuente de luz como una serie de destellos, los cuales se convierten en una serie equivalente de pulsos eléctricos. Si se cuentan los pulsos y se calcula la frecuencia del tren de pulsos, puede determinarse la posición y la velocidad de la mesa de trabajo.

Las ecuaciones que describen el funcionamiento de un sistema de posicionamiento de ciclo cerrado son similares a las de un sistema de ciclo abierto. En el codificador óptico básico, el ángulo entre las ranuras del disco debe cumplir el siguiente requerimiento:

$$\alpha = \frac{360}{n_s} \tag{39.8}$$

donde α = ángulo entre ranuras, grados/ranura; n_s = cantidad de ranuras en el disco, ranuras/rev; y 360 = grados/rev. Para cierta rotación angular de la flecha, el codificador detecta una cantidad de pulsos que está dada por

$$np = \frac{A}{\alpha} \tag{39.9}$$

donde n_p = cuenta de pulsos; A = ángulo de rotación, grados; y α = ángulo entre ranuras, grados/pulsos. El conteo de pulsos puede usarse para determinar la posición lineal del eje x de la mesa de trabajo, mediante la factorización del paso del tornillo guía. Por lo tanto,

$$x = \frac{pn_p}{n_s} \tag{39.10}$$

De manera similar, la velocidad de alimentación a la cual se mueve la mesa de trabajo se obtiene a partir de la frecuencia del tren de pulsos:

$$fr = \frac{60\,pf_p}{n_s} \tag{39.11}$$

donde f_r = velocidad de alimentación, mm/min (in/min); p = paso, mm/rev (in/rev); f_p = frecuencia del tren de pulsos, Hz (pulsos/s); n_s = cantidad de ranuras en el disco codificador, pulsos/rev; y 60 es el factor para convertir los segundos a minutos.

La serie de pulsos que genera el codificador se compara con la posición de coordenadas y la velocidad de alimentación especificadas en el programa de piezas; la unidad de control de máquina usa la diferencia para conducir un servomotor, que a su vez controla la mesa de trabajo. Se usa un convertidor digital a analógico (DAC, por sus siglas en inglés) para transformar las señales digitales que usa la MCU a una señal analógica continua, para

operar el motor conductor. Los sistemas de CN de ciclo cerrado, del tipo descrito aquí, son apropiados cuando hay una fuerza de resistencia al movimiento de la mesa. La mayoría de las operaciones de máquinas herramienta de corte de metales pertenecen a esta categoría, en particular las que implican un control de trayectoria continua, como el fresado y el torneado.

Las ecuaciones anteriores suponen una relación de engranes = 1:1. Para otras relaciones de engranes, deben hacerse ajustes en el cálculo, como se muestra en el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 39.2 Posicionamiento de ciclo cerrado con control numérico

Este sistema consiste en un servomotor, un tornillo guía y un codificador óptico que conduce una mesa de trabajo con CN. El tornillo guía tiene un paso de 5.00 mm y está acoplado a la flecha del motor con una relación de engranes de 4:1 (cuatro giros del motor por un giro del tornillo guía). El codificador óptico genera 150 pulsos/rev del tornillo guía. La mesa fue programada para moverse una distancia de 75.0 mm, a una velocidad de alimentación = 400 mm/min. Determine *a*) cuántos pulsos recibe el sistema de control para verificar que la mesa se ha movido exactamente 75.0 mm; y *b*) la razón de pulsos y *c*) la velocidad del motor que corresponde a la velocidad de alimentación especificada.

Solución: *a*) Reordenando la ecuación (39.10) para encontrar n_p,

$$n_p = \frac{xn_s}{p} = \frac{75(150)}{5} = 2250 \text{ pulsos}$$

b) La razón de pulsos que corresponde a 400 mm/min puede obtenerse al reordenar la ecuación (39.11):

$$fp = \frac{frns}{60p} = \frac{400(150)}{60(5)} = 200 \text{ Hz}$$

c) La velocidad del motor es la velocidad de la mesa dividida entre el paso y al corregir para la reducción de engranes se tiene:

$$N = \frac{r_g f_r}{p} \tag{39.12}$$

donde r_g = razón de engranes (r_g = 4.0); por lo tanto, $N = \frac{40(400)}{5} = 320$ rev/min

Observe que la cuenta de pulsos y la razón de pulsos tienen los mismos valores numéricos que en el ejemplo 39.1, puesto que el codificador está conectado al tornillo guía. Sin embargo, debido a que el servomotor gira cuatro veces por cada rotación del tornillo guía, la velocidad del motor es cuatro veces el valor anterior del motor de engranes. ■

39.1.3 Precisión en el posicionamiento

Tres medidas de precisión críticas en el posicionamiento son: la resolución de control, la exactitud y la capacidad de repetición (repetibilidad). Estos términos se explican con mayor facilidad considerando un eje único del sistema de posición.

La resolución de control se refiere a la capacidad del sistema para dividir el rango total del movimiento del eje en puntos estrechamente espaciados que pueden ser distinguidos por la unidad de control. La ***resolución* de *control*** *se* define como la distancia que separa dos puntos de control adyacentes en el movimiento del eje. En ocasiones, los puntos de control se denominan ***puntos direccionables*** porque son posiciones a lo largo del eje, hacia los cuales puede dirigirse específicamente la mesa de trabajo. Es deseable que la resolución de control sea la más pequeña posible. Esto depende de las limitaciones impuestas por 1) los componentes electromecánicos del sistema de posicionamiento y/o 2) la cantidad de bits que usa el controlador para definir la posición de las coordenadas del eje.

Los factores electromecánicos que limitan la resolución incluyen el paso del tornillo guía, la relación de engranes en el sistema conductor y el ángulo de paso en el motor de engranes (para un sistema de ciclo abierto) o el ángulo entre las ranuras en un disco codificador (para un sistema de ciclo cerrado). Juntos, estos factores determinan una resolución de control, que es la distancia mínima que puede moverse la mesa de trabajo. Por ejemplo, la resolución de control para un sistema de ciclo abierto que se conduce mediante un motor de engranes con una relación de engranes 1:1 entre el eje del motor y el tornillo guía está dada por

$$CR_1 = \frac{p}{n_s} \tag{39.13}$$

donde CR_1 = resolución de control de los componentes electromecánicos, en mm (in); p = paso del tornillo guía, en mm/rev (in/rev); y n_s = cantidad de pasos/rev. Puede desarrollarse una expresión similar para un sistema de posicionamiento de ciclo cerrado.

Aunque no es común en la tecnología computacional moderna, el segundo factor posible que limita la resolución de control es la cantidad de bits que definen el valor de coordenadas del eje. Por ejemplo, la capacidad de almacenamiento de bits del controlador puede imponer esta limitación. Si B = el número de bits en el registro de almacenamiento para el eje, el número de puntos de control entre los que puede dividirse el rango del eje $= 2^B$. Suponiendo que los puntos de control están separados por distancias iguales dentro del rango, entonces

$$CR_2 = \frac{L}{2^B - 1} \tag{39.14}$$

donde CR_2 = resolución de control del sistema de control de la computadora, mm (in); y L = rango del eje, mm (in). La resolución del control del sistema de posicionamiento es el máximo de los dos valores; esto es,

$$\text{CR} = \text{Máx}\{\text{CR1}, \text{CR2}\} \tag{39.15}$$

Por lo general, resulta conveniente que $CR_2 \leq CR_1$, lo que significa que el sistema electromecánico es el factor limitante en la resolución de control.

Cuando un sistema de posicionamiento se dirige para mover la mesa de trabajo a un punto de control determinado, la capacidad del sistema para moverse a tal punto estará limitada por errores mecánicos. Éstos se deben a diversas imprecisiones e imperfecciones en el sistema mecánico, como una holgura entre el tornillo guía y la mesa de trabajo, un retroceso en los engranes y una desviación de los componentes de la máquina. Es útil suponer que los errores forman una distribución estadística alrededor del punto de control que es la distribución neutral normal con una media = 0. Si además se supone que la desviación estándar de la distribución es constante sobre el rango de los ejes que se consideran, casi todos los errores mecánicos (99.74%) están dentro de las ±3 desviaciones estándar del punto de control. Esto se muestra en la figura 39.7 para una parte del rango del eje que incluye tres puntos de control.

Dadas estas definiciones de resolución de control y distribución de errores mecánicos, ahora se considerará la exactitud y la repetibilidad. La exactitud se define en el peor

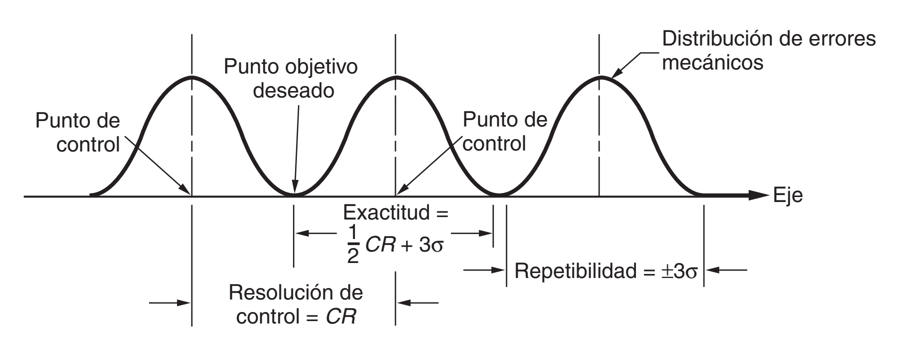


FIGURA 39.7 Una parte del eje del sistema de posicionamiento, con definición de la resolución de control, la exactitud y la repetibilidad.

de los escenarios, en el cual el punto objetivo se encuentra exactamente entre dos puntos de control adyacentes. Como el sistema sólo puede moverse a uno u otro de los puntos de control, habrá un error en la posición final de la mesa de trabajo. Si el objetivo estuviera más cerca de uno de los puntos de control, la mesa se movería al punto más cercano y el error sería más pequeño. Resulta apropiado definir la exactitud en el peor de los casos. La ***exactitud,*** de cualquier eje en un sistema de posicionamiento es el máximo error posible que puede ocurrir entre el punto objetivo deseado y la posición real que toma el sistema; expresado en forma de ecuación:

$$\text{Exactitud} = 0.5CR + 3\sigma \tag{39.16}$$

donde CR = resolución de control, mm (in); y σ = desviación estándar de la distribución de error, mm (in).

La repetibilidad se refiere a la capacidad que posee un sistema de posicionamiento para regresar a un punto de control determinado que se ha programado antes. Esta capacidad se mide en términos de los errores de posición encontrados cuando el sistema intenta colocarse en un punto de control. Los errores de posición son una manifestación de los errores mecánicos del sistema de posicionamiento, los cuales se definen mediante una distribución normal supuesta, como se describió antes. Por lo tanto, la ***repetibilidad*** de cualquier eje de un sistema de posicionamiento se define como el rango de errores mecánicos asociados con el eje; esto se reduce a

$$\text{Repetibilidad} = \pm 3\sigma \tag{39.17}$$

EJEMPLO 39.3 Resolución de control, exactitud y repetibilidad

Si se hace referencia al ejemplo 39.1, las imprecisiones mecánicas en el sistema de posicionamiento de ciclo abierto se describen mediante una distribución normal cuya desviación estándar = 0.005 mm. El rango del eje de la mesa de trabajo es de 550 mm, y hay 16 bits en el registro binario que usa el controlador digital para almacenar la posición programada. Determine *a*) la resolución de control, *b*) la exactitud y *c*) la repetibilidad para el sistema de posicionamiento.

Solución: *a*) La resolución de control es la mayor de CR_1 y CR_2, como lo definen las ecuaciones (39.13) y (39.14):

$$CR_1 = \frac{p}{ns} = \frac{5.0}{150} = 0.0333 \text{ mm}$$

$$CR_2 = \frac{L}{2^B - 1} = \frac{550}{2^{16} - 1} = \frac{550}{65{,}535} = 0.0084 \text{ mm}$$

$$CR = \text{Máx}\{0.0333, 0.0084\} = 0.0333 \text{ mm}$$

b) La exactitud se obtiene mediante la ecuación (39.16):

$$\text{Exactitud} = 0.5(0.0333) + 3(0.005) = 0.03165 \text{ mm}$$

c) La repetibilidad = ±3(0.005) = ±0.015 mm. ■

39.1.4 Programación de piezas por CN

En las aplicaciones de las máquinas herramienta, la tarea de programar el sistema se denomina programación de piezas por control numérico, debido a que el programa se prepara para una pieza determinada. Por lo general, lo realiza alguien familiarizado tanto con el proceso de trabajo con metales como con el procedimiento de programación para el equipo particular de la planta. Es posible que se usen otros términos para la programación de otros procesos, pero los principios son similares y se requiere que una persona capacitada prepare el programa. En la actualidad, los sistemas de computadora se usan ampliamente para preparar programas de CN.

La programación de piezas requiere que el programador defina los puntos, las líneas y las superficies de la pieza de trabajo en el sistema del eje y que, además, controle el

movimiento de la herramienta de corte en relación con estas características de pieza definidas. Entre las técnicas de programación de partes, las más importantes son: 1) la programación manual de piezas, 2) la programación de piezas asistida por computadora, 3) la programación de piezas asistida por CAD/CAM y 4) el ingreso manual de datos.

Programación manual de piezas Para los trabajos de maquinado sencillos punto por punto, tales como operaciones de taladrado, con frecuencia la programación manual es el método más fácil y económico. La programación manual de piezas usa datos numéricos básicos y códigos alfanuméricos especiales para definir los pasos en el proceso. Por ejemplo, para realizar una operación de taladrado se introduce un comando del siguiente tipo:

n010x70.0 y85.5 fl75 s500

Cada "palabra" en el enunciado especifica un detalle en la operación de taladrado. La palabra *n* (n010) es simplemente un número de secuencia para el enunciado. Las palabras *x* y *y* indican las posiciones de coordenadas ($x = 70.0$ mm y $y = 85.5$ mm). Las palabras *f* y *s* especifican la velocidad de alimentación y la velocidad de giro que se van a usar en la operación de taladrado (velocidad de alimentación = 175 mm/min y velocidad de giro = 500 rev/min)). El programa de piezas con CN completo consta de una secuencia de enunciados similares al comando anterior.

Programación de piezas asistida por computadora La programación de piezas asistida por computadora implica el uso de un lenguaje de programación de alto nivel. Está diseñado para la programación de trabajos más complejos que la programación manual. El primer lenguaje de programación de piezas fue la de herramientas programadas automáticamente (APT, por sus siglas en inglés), creado como una extensión de la investigación original de máquinas herramienta por CN que se usó por primera vez en producción alrededor de 1960.

En la APT la tarea de programación de piezas se divide en dos pasos: 1) definición de una configuración geométrica de pieza y 2) especificación de la trayectoria de la herramienta y la secuencia de operación. En el paso 1, el programador define la configuración geométrica de la pieza de trabajo mediante elementos básicos de geometría, como puntos, líneas, planos, círculos y cilindros. Estos elementos se definen usando enunciados de geometría de la APT, como:

P1 = POINT/25.0, 150.0
L1 = LINE/P1, P2

P1 es un punto definido en el plano *x-y* que se localiza en $x = 25$ mm y en $y = 150$ mm. L1 es una línea que va a través de los puntos P1 y P2. Se usan enunciados similares para definir círculos, cilindros y otros elementos geométricos. La mayoría de las formas de la pieza de trabajo se describen usando enunciados como éstos para especificar sus superficies, esquinas, bordes y posiciones de orificio.

La especificación de una trayectoria de herramienta se realiza con enunciados de movimiento de APT. Un enunciado común para una operación de punto a punto es

GOTO/P1

Esto dirige a la herramienta para que se mueva de su posición actual a una posición definida mediante P1, donde P1 se ha definido mediante un enunciado previo de geometría de APT. Los comandos de movimiento de trayectoria continua usan elementos de geometría como líneas, círculos y planos. Por ejemplo, considere el comando

GORGT/L3, PAST, L4

El enunciado dirige a la herramienta para que vaya a la derecha (GORGT) a lo largo de la línea L3 hasta que se coloque justo después de la línea L4 (por supuesto, L4 debe ser una línea que intersecte a L3).

Se usan enunciados APT adicionales para definir los parámetros de operación, como velocidades de alimentación, velocidades de giro, tamaños de herramientas y tolerancias. Cuando se termina, el programador introduce el programa APT a la computadora; durante el procesamiento se generan enunciados de bajo nivel (similares a los que se preparan en la programación manual de piezas) para que los use una máquina herramienta particular.

Programación de piezas asistida por sistemas CAD/CAM El uso de estos sistemas lleva a la programación de piezas asistida por computadora un paso adelante, usando un sistema gráfico computarizado CAD/CAM que interactúa con el programador conforme se prepara el programa de piezas. En el uso convencional de la APT se escribe un programa completo y después se introduce en la computadora para su procesamiento. Muchos errores de programación no se detectan sino hasta el procesamiento en la computadora. Cuando se usa un sistema CAD/CAM, el programador recibe una verificación visual inmediata conforme introduce cada enunciado para determinar si es correcto. Cuando el programador introduce la configuración geométrica de piezas, el elemento se despliega gráficamente en el monitor. Conforme el programador diseña la trayectoria de una herramienta, ve exactamente cómo desplazarán los comandos de movimiento a la herramienta, en relación con la pieza. Los errores se corrigen de inmediato y no después de escribir el programa completo.

La interacción entre el programador y el sistema de programación es un beneficio significativo de la programación asistida por CAD/CAM. Hay otros beneficios importantes al usar CAD/CAM en la programación de piezas por CN. Primero, el diseño del producto y sus componentes puede obtenerse en un sistema CAD/CAM. El programador de control numérico recupera la base de datos de diseño resultante, incluida la definición geométrica de cada pieza, para usarla como la configuración geométrica inicial para la programación de piezas. Esta recuperación ahorra un tiempo valioso en comparación con la reconstrucción de la pieza desde cero, usando enunciados de geometría de la APT.

Segundo, existen rutinas especiales de software disponibles comercialmente para la programación de piezas mediante sistemas CAD/CAM, que automatizan algunas secciones de la herramienta y generan trayectorias de una ruta, tales como un perfilado por fresado en la superficie de un pieza, el fresado de una cavidad dentro de la superficie de una pieza, la elaboración de contornos en superficies y ciertas operaciones punto a punto. El programador de pieza solicita estas rutinas como comandos especiales ***macro***. Su uso produce ahorros significativos en el tiempo y esfuerzo de programación.

Ingreso manual de datos El ingreso manual de datos (MDI, por sus siglas en inglés) es un método en el cual un operador de máquina introduce el programa de piezas en la fábrica. El método usa una pantalla CRT con capacidad de imágenes en los controles de la máquina herramienta. Los enunciados de programación de piezas por CN se introducen mediante un procedimiento controlado con menús que requiere una capacitación mínima del operador de la máquina herramienta. Debido a que la programación de piezas está simplificada y no requiere personal especial en la programación de piezas con CN, el MDI es una forma adecuada para que los talleres especializados instrumenten económicamente el control numérico en sus operaciones.

39.1.5 Aplicaciones del control numérico

El maquinado es un área importante de aplicación para el control numérico, pero el principio de operación del CN también se aplica a otras actividades. En muchos procesos industriales, debe controlarse la posición de una cabeza de trabajo de acuerdo con la pieza o producto en los que se trabaja. Las aplicaciones se dividen en dos categorías: 1) aplicaciones de máquinas herramienta y 2) aplicaciones que no son de máquinas herramienta. Debe señalarse que no todas las aplicaciones se identifican con el nombre de control numérico en sus respectivas industrias.

En la categoría de máquinas herramienta, el control numérico se usa ampliamente para ***operaciones de maquinado***, tales como el torneado, el taladrado y el fresado (secciones 22.1, 22.2 y 22.3, respectivamente). El uso del CN en estos procesos ha motivado el

desarrollo de máquinas herramientas altamente automatizadas, llamadas ***centros de maquinado***, las cuales cambian sus propias herramientas de corte para realizar diversas operaciones de maquinado bajo un programa de CN (sección 22.4). Además del maquinado, otras máquinas herramienta controladas numéricamente son: 1) máquinas para esmerilado (sección 25.1), 2) máquinas para procesamiento en prensa de láminas metálicas (sección 20.5.2), 3) máquinas para doblado de tubos (sección 20.7) y 4) procesos de corte térmico (sección 26.3).

En la categoría de las que no son para máquinas herramienta, las aplicaciones de CN incluyen: 1) máquinas de colocación de cinta y máquinas de devanado de filamentos para compuestos (sección 15.2.3 y sección 15.4), 2) máquinas para soldadura por fusión, tanto con arco (sección 31.1) como con resistencia (sección 31.2), 3) máquinas para inserción de componentes en ensambles electrónicos (secciones 36.3 y 36.4), 4) máquinas de dibujo y 5) máquinas de medición de coordenadas para inspección (sección 45.5.1).

Entre los beneficios del CN relacionados con el equipo que se opera manualmente en estas aplicaciones están: 1) menor tiempo improductivo, lo que resulta en ciclos más cortos, 2) tiempos de manufactura más cortos, 3) reparaciones más sencillas, 4) mayor flexibilidad de manufactura, 5) mayor exactitud y 6) menos errores humanos.

39.2 ROBÓTICA INDUSTRIAL

Un ***robot industrial*** es una máquina programable de propósito general que posee ciertas características antropomórficas; más evidente es un brazo mecánico o manipulador. La unidad de control para un robot industrial moderno es una computadora que se programa para ejecutar subrutinas bastante sofisticadas, lo cual proporciona al robot una inteligencia que en ocasiones parece casi humana. El manipulador del robot, junto con un controlador de alto nivel, permite que un robot industrial realice diversas tareas, como cargar y descargar máquinas herramienta, aplicar soldadura de puntos y pintar por aspersión. En general, los robots se usan como sustitutos de trabajadores en estas tareas. El primer robot industrial se instaló en una operación de fundición a troquel en la Ford Motor Company. El trabajo del robot consistió en descargar las piezas de la máquina de fundición a troquel.

En esta sección, se consideran diversos aspectos de la tecnología y las aplicaciones de robots, incluido cómo se programan éstos para realizar sus tareas.

39.2.1 Anatomía de un robot

Un robot industrial consta de un manipulador mecánico y un controlador para moverlo y realizar otras funciones relacionadas. El manipulador mecánico posee uniones que colocan y orientan el extremo del manipulador respecto a su base. La unidad controladora está formada por el hardware y el software electrónicos para operar las uniones en forma coordinada, cuyo propósito es ejecutar el ciclo de trabajo programado. La ***anatomía de un robot*** se relaciona con el manipulador mecánico y su construcción. La figura 39.8 muestra una de las configuraciones comunes de un robot industrial.

Articulaciones y uniones para manipulación Una articulación en un robot es similar a la del cuerpo humano. Proporciona un movimiento relativo entre dos partes del cuerpo. A cada articulación se conecta una unión de entrada y una de salida. Cada articulación mueve su unión de entrada en relación con su unión de salida. El robot manipulador consiste en una serie de combinaciones unión-articulación-unión. La unión de salida de una articulación es la unión de entrada para la siguiente. Los robots industriales típicos tienen cinco o seis articulaciones, y el movimiento coordinado le proporciona al robot la capacidad de mover, colocar y orientar objetos y herramientas para efectuar un trabajo útil. Las articulaciones de un manipulador se clasifican como lineales o rotatorias, indicando el movimiento de la unión de salida en relación con la unión de entrada.



FIGURA 39.8 El manipulador de un robot industrial moderno. (Foto cortesía de Adept Technology, Inc).

Diseño de un manipulador El manipulador se construye usando articulaciones de los dos tipos básicos, cada articulación separada de la anterior mediante una unión. La mayoría de los robots industriales se monta en el piso. Puede identificarse la base de la unión como 0; ésta es la unión de entrada a la articulación 1, cuya salida es la unión 1, que a su vez es la entrada de la articulación 2, cuya unión de salida es la 2, y así sucesivamente, para la cantidad de articulaciones en el manipulador.

Los manipuladores de robot por lo general se dividen en dos secciones: ensamble de brazo y cuerpo y ensamble de muñeca. Normalmente se asocian tres articulaciones con el ensamble de brazo y cuerpo, y dos o tres con el de muñeca. El de brazo y cuerpo tiene una función diferente del de muñeca. La función del primero es colocar un objeto o herramienta y la del segundo es orientar de manera adecuada el objeto u herramienta. La colocación se refiere a mover la pieza u objeto de una posición a otra. La orientación se relaciona con la alineación precisa del objeto de acuerdo con alguna posición estacionaria en el área de trabajo.

Para realizar estas funciones, los diseños de brazo y cuerpo son diferentes de los de muñeca. La colocación requiere movimientos espaciales grandes, en tanto que la orientación requiere movimientos de giro y rotación, para alinear la pieza o herramienta, relacionados con una posición física en el lugar de trabajo. Un ensamble de brazo y cuerpo posee uniones y articulaciones grandes, mientras que el de muñeca consta de uniones cortas. Con frecuencia las articulaciones de brazo y cuerpo consisten en los tipos lineal y rotatorio, mientras que las uniones de muñeca casi siempre son de este tipo.

En los robots comerciales hay cinco configuraciones básicas de brazo y cuerpo. Estos tipos se identifican en la figura 39.9. El diseño mostrado en el inciso *e*) de la figura y en la

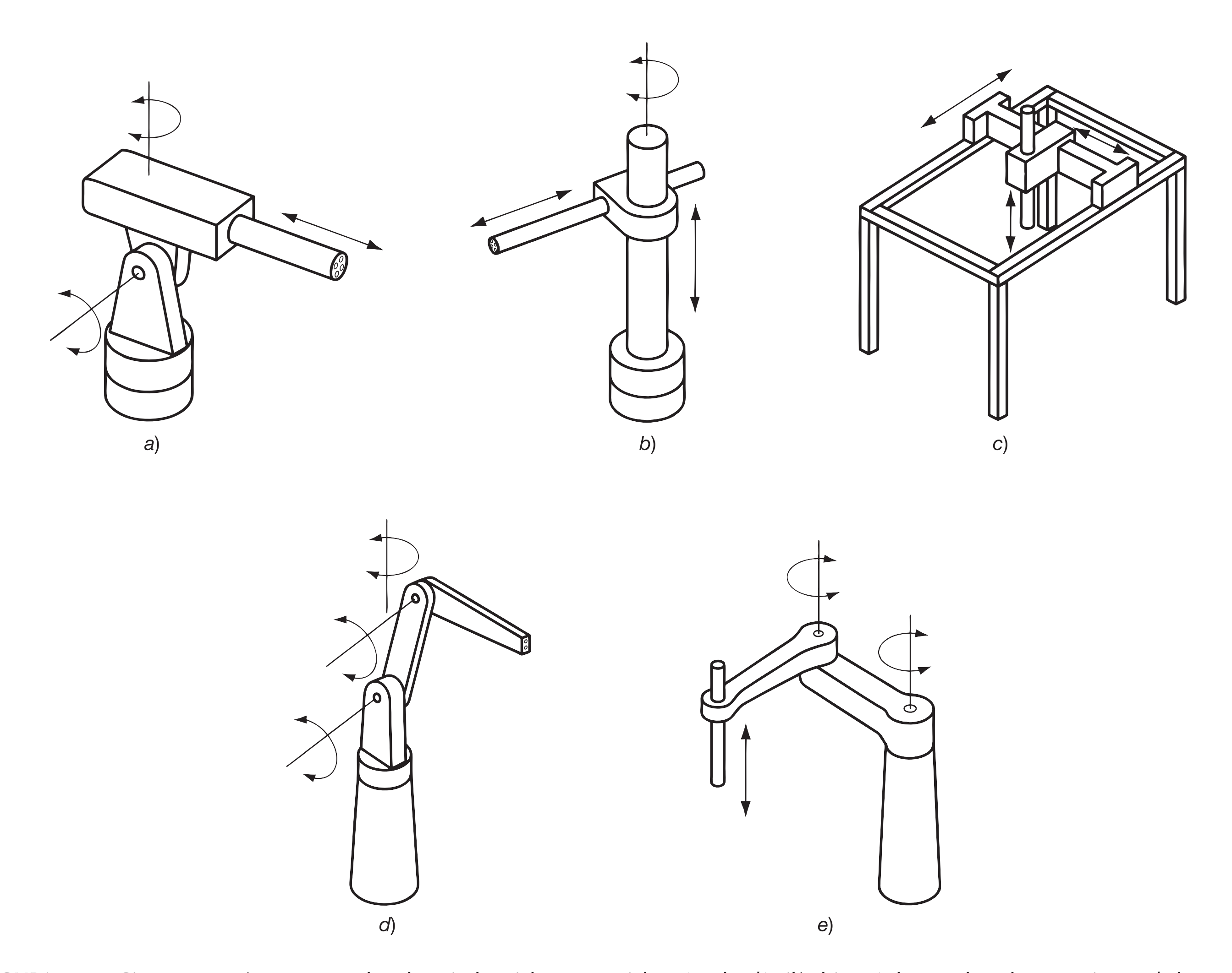


FIGURA 39.9 Cinco anatomías comunes de robots industriales comerciales: *a*) polar, *b*) cilíndrica, *c*) de coordenadas cartesianas, *d*) de brazo articulado y *e*) SCARA, o brazo robótico de ensamble selectivamente dócil.

figura 39.8 se llama robot SCARA, que significa brazo robótico de ensamble selectivamente dócil (*selectively compliant assembly robot arm).* Es similar a una articulación de brazo humano, excepto porque las articulaciones del hombro y el codo tienen ejes verticales de rotación, por lo que proporcionan rigidez en la dirección vertical, pero docilidad relativa en la dirección horizontal.

La muñeca se ensambla en la última unión en cualquiera de estas tres configuraciones de brazo y cuerpo. En ocasiones, el SCARA es una excepción, porque casi siempre se usa para tareas sencillas de manejo y ensamble que implican movimientos verticales. Por lo general, no se presenta una muñeca en el extremo de su manipulador. El sustituto de la muñeca en el SCARA es una pinza para asir componentes, cuyo propósito es moverlos y/o ensamblarlos.

Volumen de trabajo y precisión de movimiento Una consideración técnica importante para un robot industrial es su ***volumen de trabajo***. Éste se define como el área dentro de la cual un robot manipulador puede colocar y orientar el extremo de su muñeca. La cantidad de articulaciones determina el área anterior, así como sus tipos y rangos, y los tamaños de las uniones. El volumen de trabajo es importante porque representa una función esencial que determina cuáles aplicaciones puede ejecutar un robot.

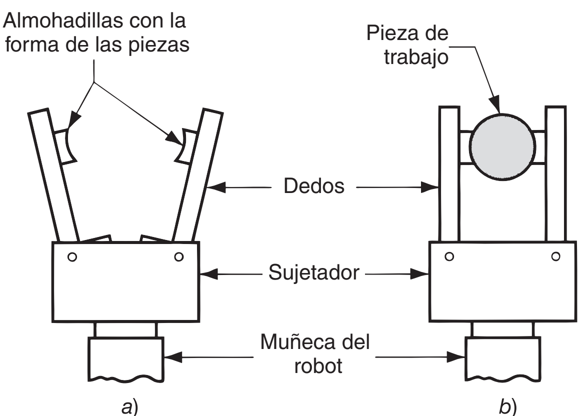


FIGURA 39.10 Un sujetador de robot: *a*) abierto y *b*) cerrado para asir una pieza de trabajo.

Las definiciones de resolución de control, exactitud y capacidad de repetición tratadas en la sección 39.1.3 para los sistemas de posicionamiento por CN se aplican en los robots industriales. Un robot manipulador es, después de todo, un sistema de posicionamiento. En general, las uniones y las articulaciones de los robots no son tan rígidas como sus contrapartes de las máquinas herramienta y, por ende, su exactitud y su repetibilidad de movimientos no son tan buenos.

Actuadores finales Un robot industrial es una máquina de propósito general. Para que un robot sea útil en una aplicación particular, debe equiparse y habilitarse con herramientas diseñadas especialmente para una aplicación. Un ***actuador final*** es la habilitación especial de herramientas que se conectan al extremo de la muñeca del robot para realizar la tarea específica. Existen dos tipos generales de actuadores finales: herramientas y sujetadores. La ***herramienta*** se utiliza cuando el robot debe realizar una operación de procesamiento. Las herramientas especiales incluyen pistolas para soldadura de puntos, herramientas para soldadura con arco, boquillas para pintar por aspersión, ejes rotatorios, sopletes para calentamiento y herramientas de ensamble (por ejemplo, un destornillador automático). El robot se programa para manipular la herramienta que se necesita para la pieza de trabajo que se procesa.

Los ***sujetadores*** están diseñados para asir y mover los objetos durante el ciclo de trabajo. En general, los objetos son piezas de trabajo y el actuador final debe diseñarse específicamente para la pieza. Los sujetadores se usan para aplicaciones de colocación de piezas, carga y descarga de máquinas y para colocar piezas sobre tarimas. En la figura 39.10 se muestra una configuración común de sujetador.

39.2.2 Sistemas de control y programación de robots

El controlador de un robot está formado por el hardware y el software electrónicos para controlar las articulaciones durante la ejecución de un ciclo de trabajo programado. La mayoría de las unidades de control de robots actuales se basan en un sistema de microcomputadora. Los sistemas de control en la robótica se clasifican del siguiente modo:

1. ***Control limitado de secuencia***. Este sistema de control está diseñado para ciclos de movimiento simples, como "tomar y colocar". No requiere un microprocesador, y en general se lleva a cabo mediante interruptores de límite y detenciones mecánicas, junto con un secuenciador para coordinar el funcionamiento sincronizado de las articulaciones. Los robots que usan el control limitado de secuencia con frecuencia se hacen funcionar en forma neumática.
2. ***Reproducción con control punto a punto*** (***PTP,*** por sus siglas en inglés). Igual que en el control numérico, los sistemas de movimiento de robot se dividen: de punto a punto y trayectoria continua. El programa para un robot de reproducción punto a punto consiste en una serie de posiciones de puntos y la secuencia en la que éstos deben visitarse durante el ciclo de trabajo. Durante la programación, estos puntos se graban en la

memoria y después se reproducen durante la ejecución del programa. En los movimientos punto a punto, no se controla la trayectoria recorrida para llegar a la posición final.

3. ***La reproducción con control de trayectoria continua*** (***CP,*** por sus siglas en inglés). El control de trayectoria continua es similar al de punto a punto, excepto que en la memoria se almacenan trayectorias de movimiento en lugar de puntos individuales. En ciertos tipos de movimientos de trayectoria continua regulares, como una trayectoria en línea recta entre dos posiciones de puntos, la unidad controladora calcula la trayectoria que requiere el manipulador para cada movimiento. Para movimientos continuos irregulares, como los que se siguen cuando se pinta por aspersión, la trayectoria se define mediante una serie de puntos estrechamente espaciados que se aproximan a una trayectoria continua y regular. Los robots capaces de movimientos de trayectoria continua también pueden ejecutar movimientos de punto a punto.
4. ***Control inteligente***. Los robots industriales modernos exhiben características que a menudo los hacen parecer inteligentes. Estas características incluyen la capacidad de responder a sensores sofisticados, tales como una máquina de visión, tomar decisiones cuando hay errores durante el ciclo de trabajo, hacer cálculos y comunicarse con los humanos. La inteligencia de los robots se instrumenta mediante controladores con microprocesadores poderosos y técnicas de programación avanzadas.

Los robots ejecutan un programa de instrucciones almacenadas que definen la secuencia de movimientos y posiciones en el ciclo de trabajo, en forma muy parecida a un programa de piezas por CN. Además de las instrucciones de movimiento, el programa incluye instrucciones para otras funciones, como interactuar con equipo externo, responder a los sensores y procesar datos.

Se usan dos métodos básicos para enseñar sus programas a los robots modernos: programación de ejemplo y lenguajes de programación de computadoras. La ***programación de ejemplo*** implica un método de enseñanza mediante ejemplos, en la cual el programador mueve el manipulador a través de la secuencia de posiciones en el ciclo de trabajo. El controlador registra cada posición en la memoria para la reproducción subsecuente. Existen dos procedimientos para conducir al robot a través de la secuencia de movimientos: con energía y manual. En la ***enseñanza mediante ejemplo con energía*** se usa una caja de control para conducir al manipulador. La caja de control, denominada enchufe para enseñanza, tiene interruptores de conmutación o botones que se oprimen para controlar las articulaciones. Usando el enchufe para enseñanza, el programador mueve el manipulador a cada posición y graba en la memoria las posiciones de la articulación correspondientes. La enseñanza mediante ejemplo con energía es el método común para programar los robots de reproducción con control punto a punto. La ***enseñanza mediante ejemplo manual*** se usa comúnmente para robots de reproducción con control de trayectoria continua. En este método, el programador mueve físicamente la muñeca del manipulador a través del ciclo de movimientos. Para pintura por aspersión y otros trabajos, éste es el medio más conveniente para programar el robot.

Los ***lenguajes de programación de computadoras*** para controlar robots han evolucionado a partir del uso de controladores de microcomputadoras. Unimation, Inc. introdujo el primer lenguaje comercial alrededor de 1979. Los lenguajes de computadoras proporcionan una forma conveniente de integrar ciertas funciones que no implican movimiento en el ciclo de trabajo, como los cálculos y el procesamiento de datos, la lógica de decisiones, el entrelazado con otro equipo, la interfaz con sensores y las interrupciones. En la referencia [6] se presenta un análisis más profundo de la programación de robots.

39.2.3 Aplicaciones de robots industriales

Algunos trabajos industriales se prestan para las aplicaciones de robots. Las características más importantes que tienden a promover la sustitución de un trabajador humano por un robot, en ciertas condiciones de trabajo, son las siguientes: 1) el ambiente de trabajo es peligroso para las personas, 2) el ciclo de trabajo es repetitivo, 3) el trabajo se realiza en

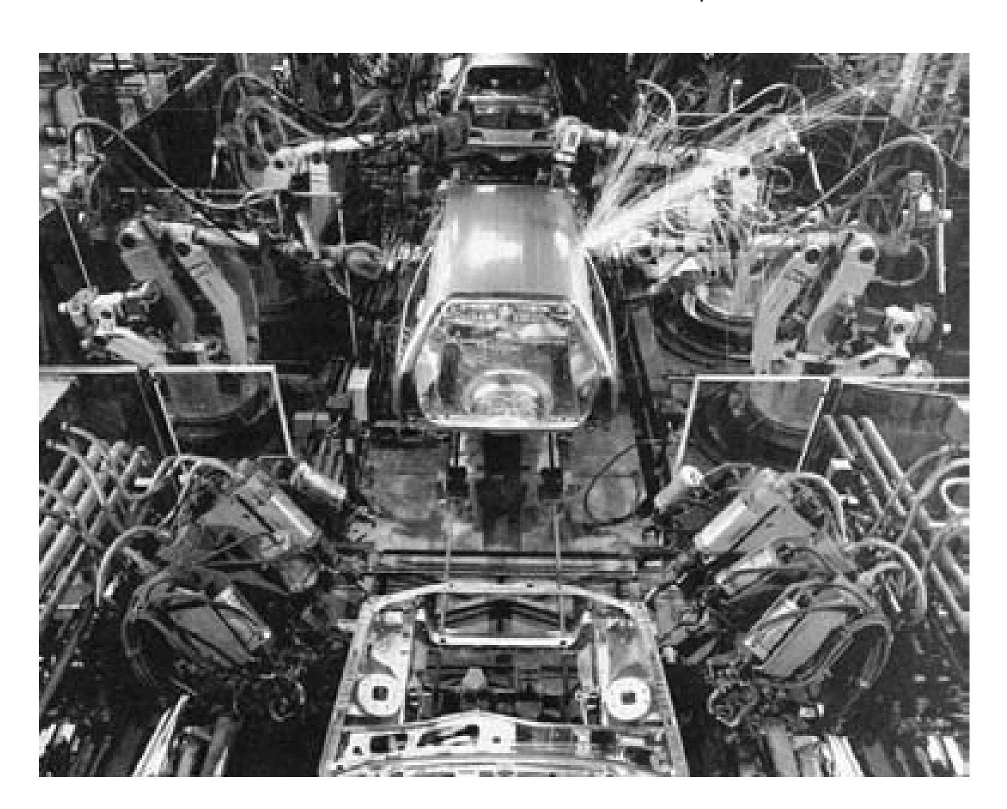


FIGURA 39.11 Parte de una línea de ensamble automotriz en la cual los robots ejecutan operaciones de soldadura de puntos. (Foto cortesía de Ford Motor Company).

una posición estacionaria, 4) el manejo de la pieza o la herramienta sería difícil para los humanos, 5) es una operación de cambios múltiples, 6) hay largas líneas de producción y los relevos no son frecuentes y 7) la colocación y orientación de las piezas se establecen al inicio del ciclo de trabajo, dado que la mayoría de los robots no puede ver.

Las aplicaciones de los robots industriales que tienden a cumplir estas características se dividen en tres categorías básicas: 1) manejo de material, 2) operaciones de procesamiento y 3) ensamble e inspección.

Las aplicaciones de ***manejo de material*** implican el movimiento de materiales o piezas de una posición y orientación a otra. Para realizar la tarea de recolocación, el robot está equipado con un sujetador. Como se dijo antes, éste debe diseñarse específicamente para asir la pieza particular en la aplicación. Las aplicaciones de manejo de materiales incluyen la transferencia de materiales (colocación de piezas, cargar sobre tarimas y descargar tarimas) y carga y/o descarga de máquinas (por ejemplo, máquinas herramienta, prensas y moldes de plástico).

Las ***operaciones de procesamiento*** requieren que el robot manipule una herramienta como el actuador final. Entre las aplicaciones están la soldadura de puntos, la soldadura continua con arco eléctrico, el recubrimiento por aspersión y ciertas operaciones de corte y eliminación de rebabas en metal, en las cuales el robot manipula una herramienta especial. En cada una de estas operaciones se usa una herramienta (por ejemplo, una pistola para soldadura de puntos o una boquilla para pintura por aspersión) como el actuador final del robot. En la figura 39.11 se ilustra una aplicación de soldadura de puntos. La soldadura de puntos es una aplicación común de los robots industriales en la industria automotriz.

Las aplicaciones de ensamble e inspección no pueden clasificarse en forma definida en cualquiera de las dos categorías anteriores, porque en ocasiones implican el manejo de piezas y otras veces la manipulación de una herramienta. Las aplicaciones de ***ensamble*** frecuentemente requieren el apilamiento de una pieza sobre la otra, lo cual es básicamente una tarea de manejo de piezas. En otras operaciones de ensamble, se manipula una herramienta, como un destornillador automático. Asimismo, las operaciones de ***inspección*** en ocasiones requieren que el robot coloque una pieza de trabajo en relación con un dispositivo de inspección o que cargue una pieza en una máquina de inspección, mientras otras aplicaciones implican la manipulación de un sensor para realizar una inspección.

REFERENCIAS

[1] Asfahl, C. R., ***Robots and Manufacturing Automation***, John Wiley & Sons. Inc., Nueva York, 1992.

[2] Bollinger, J. G. y Duffie N. A., ***Computer Control of Machines and Processes***, Addison-Wesley Longman, Inc., Nueva York, 1989.

[3] Chang, C-H, y Melkanoff, M. A., ***NC Machine Programming and Software Design***, 3a. ed., Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, N. J. 2005.

[4] Engelberger. J. F., ***Robotics in Practice: Management and Applications of Robotics in Industry***, AMACOM, Nueva York, 1985.

[5] Groover, M. P., ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing***, 2a. ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

[6] Groover, M. P., Weiss, M., Nagel, R. N. y Odrey, N. G., ***Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications***, McGraw-Hill, Nueva York, 1986.

[7] Noaker, P. M., "Down the Road with DNC", ***Manufacturing Engineering***, noviembre de 1992, pp. 35-39.

[8] Seames W., ***Computer Numerical Control, Concepts and Programming***, Delmar-Thomson Learning, Albany, Nueva York, 2002.

[9] Weber, A., "Robot dos and don'ts", ***Assembly***, febrero de 2005, pp. 50-57.

PREGUNTAS DE REPASO

39.1. Identifique y describa brevemente los tres componentes básicos de un sistema de control numérico.

39.2. ¿Cuál es la diferencia entre un ensamble punto a punto y uno de trayectoria continua en un sistema de control de movimientos?

39.3. ¿Cuál es la diferencia entre el posicionamiento absoluto y el posicionamiento incremental?

39.4. ¿Cuál es la diferencia entre un sistema de posicionamiento de ciclo abierto y uno de ciclo cerrado?

39.5. ¿Bajo cuáles circunstancias se prefiere un sistema de posicionamiento de ciclo cerrado a uno de ciclo abierto?

39.6. Explique las operaciones de un codificador óptico.

39.7. ¿Por qué debe ser el sistema electromecánico el factor limitante en la resolución de control y no el registro de almacenamiento del controlador?

39.8. ¿Qué es el ingreso manual de datos en la programación de piezas por CN?

39.9. Identifique algunas de las aplicaciones del control numérico que no son para máquinas herramienta.

39.10. ¿Cuáles son algunos de los beneficios que por lo general se citan para el CN en comparación con el uso de métodos manuales alternativos?

39.11. ¿Qué es un robot industrial?

39.12. ¿En qué se parece un robot industrial al control numérico?

39.13. ¿Qué es un actuador final?

39.14. En la programación de robots, ¿cuál es la diferencia entre la enseñanza mediante ejemplo con energía y la enseñanza mediante ejemplo manual?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 13 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

39.1. ¿En cuál de las siguientes opciones se basa el sistema de coordenadas estándar para las máquinas herramienta con control numérico?: *a*) coordenadas cartesianas, *b*) coordenadas cilíndricas o *c*) coordenadas polares.

39.2. Identifique cuáles de las siguientes aplicaciones son operaciones punto a punto y no operaciones de trayectoria continua (tres respuestas correctas): *a*) soldadura con arco, *b*) taladrado, *c*) perforación de orificios en láminas metálicas, *d*) fresado, *e*) soldadura de puntos y *f*) torneado.

39.3. ¿Mediante cuál de los siguientes términos se mide la capacidad de un sistema de posicionamiento para retomar a una posición previamente definida? *a*) precisión, *b*) resolución de control o *c*) repetibilidad.

39.4. ¿Cuál de los siguientes es el comando GORGT en APT? (dos mejores respuestas): *a*) comando de trayectoria continua, *b*) enunciado de geometría que implica un volumen de revolución en relación con un eje central, *c*) nombre del monstruo en una película de ciencia ficción japonesa de 1960, *d*) un comando punto a punto o *e*) un comando de trayectoria en el cual la herramienta debe ir a la derecha (*go right*) en el movimiento siguiente.

39.5. Por lo general, ¿cuál de las siguientes funciones es realizada por el brazo y el cuerpo de un manipulador de robot, en una aplicación?: *a*) sujetar el actuador final, *b*) orientación dentro del volumen de trabajo o *c*) posicionamiento dentro del volumen de trabajo.

39.6. ¿Con cuál de las siguientes aplicaciones se asocia normalmente un robot SCARA? *a*) soldadura con arco, *b*) ensamble, *c*) inspección, *d*) carga y descarga de máquinas o *e*) soldadura por resistencia.

39.7. En la robótica, ¿cuál de las siguientes operaciones se clasifican como las aplicaciones de pintura por aspersión? *a*) operación de trayectoria continua o *b*) operación punto a punto.

39.8. ¿Cuáles de las siguientes son características de situaciones de trabajo que tienden a promover la sustitución de una persona con un robot? (tres mejores respuestas): *a*) cambios de empleo frecuentes, *b*) ambiente de trabajo peligroso, *c*) ciclos de trabajo repetitivos, *d*) varios turnos de trabajo y *e*) la tarea requiere movilidad.

PROBLEMAS

Sistemas de posicionamiento de ciclo abierto

39.1. Un tornillo guía con un paso de 7.5 mm conduce una mesa de trabajo en un sistema de posicionamiento por CN. El tornillo guía es impulsado por un motor de engranes que tiene 250 ángulos de paso. La mesa de trabajo está programada para moverse una distancia de 120 mm desde su posición presente a una velocidad de viaje de 300 mm/min. Determine *a*) los pulsos que se requieren para mover la mesa a la distancia especificada y *b*) la velocidad de motor y la razón de pulsos requeridas para obtener la velocidad de mesa deseada.

39.2. En relación con el problema anterior, las imprecisiones mecánicas en el sistema de posicionamiento de ciclo abierto pueden describirse mediante una distribución normal cuya desviación estándar es de 0.005 mm. El rango del eje de la mesa de trabajo es de 500 mm y hay 12 bits en el registro binario que usa el controlador digital para almacenar la posición programada. Para el sistema de posicionamiento, determine *a*) la resolución de control, *b*) la exactitud y *c*) la repetibilidad. *d*) ¿Cuál es la cantidad mínima de bits que debe tener el registro binario para que el sistema de conducción mecánica se convierta en el componente limitante en la resolución del control?

39.3. Un motor de engranes tiene 200 ángulos de paso. Su eje de salida está acoplado directamente a un tornillo guía con un paso de 0.250 in. El tornillo guía controla una mesa de trabajo. La mesa debe moverse una distancia de 5.00 in desde su posición actual a una velocidad de viaje de 20.0 in/min. Determine *a*) los pulsos que se requieren para mover la mesa a la distancia especificada y *b*) la velocidad de motor y la razón de pulsos requeridas para obtener la velocidad de mesa deseada.

39.4. Un motor de engranes con 240 ángulos de paso está acoplado a un tornillo guía a través de una reducción de engranes de 5:1 (cinco rotaciones del motor por una del tornillo guía). El tornillo guía tiene 6 roscas/in. La mesa de trabajo que conduce el tornillo guía debe moverse una distancia de 10.00 in a una velocidad de alimentación de 30.0 in/min. Determine *a*) la cantidad de pulsos requeridos para mover la mesa y *b*) la velocidad de motor y razón de pulsos requeridas para obtener la velocidad de mesa deseada.

39.5. La unidad de conducción para una mesa de posicionamiento se controla mediante un tornillo guía directamente acoplado al eje de salida de un motor de engranes. El paso del tornillo guía es de 0.18 in. La mesa debe tener una velocidad lineal de 35 in/min y una exactitud de posicionamiento de 0.001 in. Los errores mecánicos en el motor, el tornillo guía y la conexión de la mesa se caracterizan por una distribución normal con una desviación estándar de 0.0002 in. Determine *a*) la cantidad mínima de ángulos de paso en el motor de engranes para obtener la exactitud, *b*) el ángulo de paso asociado y *c*) la frecuencia del tren de pulsos requerida para conducir la mesa a la velocidad deseada.

39.6. La mesa de posicionamiento para una máquina de inserción de componentes usa un motor de engranes y un mecanismo de tornillo guía. Las especificaciones de diseño requieren una velocidad de mesa de 40 in/min y una precisión de 0.0008 in. El paso del tornillo guía de 0.2 in, y la razón de engranes es de 2:1 (2 giros del motor por 1 giro del tornillo guía). Los errores mecánicos en la conexión del motor, caja de engranes, tornillo guía y la mesa se caracterizan por una distribución normal con una desviación estándar de 0.0001 in. Determine *a*) la cantidad mínima de ángulos de paso en el motor de engranes y *b*) la frecuencia del tren de pulso requerida para conducir la mesa a la velocidad máxima deseada.

39.7. La unidad de conducción de una mesa de posicionamiento para una máquina de inserción de componentes se basa en un motor de engranes y en un mecanismo de tornillo guía. Las especificaciones para la velocidad de la mesa son de 25 mm/s para un rango de 600 mm y para la precisión de 0.025 mm. El paso del tornillo guía es de 4.5 mm y la razón de engranes de 5:1 (5 giros del motor por cada tornillo guía). Los errores mecánicos en la conexión del motor, la caja de engranes, el tornillo guía y la mesa se caracterizan por una distribución normal con una desviación estándar de 0.005 mm. Determine *a*) la cantidad mínima de ángulos de paso en el motor de engranes y *b*) la frecuencia del tren de pulso requerida para conducir la mesa a la velocidad máxima deseada.

39.8. Los dos ejes de una mesa de posicionamiento *x-y* son conducidos cada uno por un motor de engranes conectado a un tornillo guía con una reducción de engranes de 10:1. El número de ángulos de paso de cada motor de engranes es de 20. Cada tornillo guía tiene un paso de 5.0 mm y proporciona un rango de eje de 300.0 mm. Hay 16 bits en cada registro binario que usa el controlador para almacenar datos

de posición para los dos ejes. *a*) ¿Cuál es la resolución de control de cada eje?, *b*) ¿cuáles son las velocidades de rotación requeridas y las frecuencias del tren de pulsos correspondiente que requiere cada motor de engranes, para conducir la mesa a 600 mm/min en una línea recta desde el punto (25, 25) hasta el punto (100, 150)? No tome en cuenta la aceleración.

Sistemas de posicionamiento de ciclo cerrado

39.9. Una mesa de máquina herramienta por CN es impulsada por un servomotor, un tornillo guía y un codificador óptico. El tornillo guía tiene un paso de 5.0 mm y está conectado al eje del motor con una razón de engranes de 16:1 (16 giros del motor por uno del tornillo guía). El codificador óptico está conectado directamente al tornillo guía y genera 200 pulsos/rev del tornillo guía. La mesa debe moverse una distancia de 100 mm a una velocidad de alimentación de 500 mm/min. Determine a) el conteo de pulsos que recibe el sistema de control para verificar que la mesa se ha movido exactamente 100 mm, *b*) la razón de pulsos y *c*) la velocidad de motor que corresponde a la velocidad de alimentación de 500 mm/min.

39.10. Resuelva de nuevo el problema anterior, considerando que el codificador óptico se acople directamente al eje del motor en lugar de al tornillo guía.

39.11. La mesa de trabajo de una máquina herramienta con CN se conduce mediante un sistema de posicionamiento de ciclo cerrado que consiste en un servomotor, un tornillo guía y un codificador óptico. El tornillo guía tiene 6 roscas/in y está acoplado directamente al eje de motor (razón de engranes de 1:1). El codificador óptico genera 225 pulsos por revolución de motor. La mesa ha sido programada para moverse una distancia de 7.5 in, a una velocidad de alimentación de 20.0 in/min. *a*) ¿Cuántos pulsos recibe el sistema de control para verificar que la mesa se ha movido la distancia programada? ¿Cuál es *b*) la velocidad de pulsos y *c*) la velocidad de motor que corresponden a la velocidad de alimentación especificada?

39.12. Se usa un tornillo guía acoplado directamente a un servomotor de corriente directa para conducir uno de los ejes de una mesa de una máquina para fresado por CN. El tornillo guía tiene 5 roscas/in. El codificador óptico conectado al tornillo guía emite 100 pulsos/rev del tornillo guía. El motor gira a una velocidad máxima de 800 rev/min. Determine *a*) la resolución de control del sistema, expresada en la distancia de viaje lineal del eje de la mesa, *b*) la frecuencia del tren de pulsos que emite el codificador óptico cuando el servomotor opera a máxima velocidad y *c*) la velocidad de viaje de la mesa a las rpm máximas del motor.

39.13. Resuelva el problema anterior, considerando que el servomotor está conectado al tornillo guía a través de una caja de engranes cuya razón de reducción es de 12:1 (12 revoluciones del motor por cada revolución del tornillo guía).

39.14. Un tornillo guía conectado a un servomotor de corriente directa es el sistema de conducción para la mesa de posicionamiento. El paso del tornillo guía es de 4 mm. El codificador óptico conectado al tornillo guía emite 250 pulsos/rev del tornillo guía. El motor opera a una velocidad de 15 rev/s. Determine *a*) la resolución de control del sistema, expresada en distancia de viaje lineal del eje de la mesa, *b*) la frecuencia del tren de pulsos que emite el codificador óptico cuando el servomotor opera a 14 rev/s y *c*) la velocidad de viaje de la mesa a la velocidad de operación del motor.

39.15. Se ejecuta una operación de fresado en un centro de maquinado por CN. La distancia de viaje total es de 300 mm en una dirección paralela a uno de los ejes de la mesa de trabajo. La velocidad de corte es de 1.25 m/s y una carga de pastilla de 0.05 mm. El extremo de corte para fresado tiene cuatro dientes y su diámetro es de 20.0 mm. El eje usa un servomotor de corriente directa cuyo eje de salida está acoplado a un tornillo guía con un paso de 6.0 mm. El dispositivo sensor de retroalimentación es un codificador óptico que emite 250 pulsos por revolución. Determine *a*) la velocidad de alimentación y el tiempo para terminar el corte y *b*) la velocidad de rotación del motor y la razón de pulsos del codificador a la velocidad de alimentación indicada.

39.16. Se realiza una operación de fresado de extremos a lo largo de una trayectoria en línea recta con una longitud de 325 mm. El corte se realiza en dirección paralela al eje x, en un centro de maquinado con CN. La velocidad de corte es de 30 m/min y la carga de pastilla de 0.06 mm. El extremo cortador de fresado tiene dos dientes y su diámetro es de 16.0 mm. El eje x usa un servomotor de corriente directa conectado directamente a un tornillo guía, cuyo paso es de 6.0 mm. El dispositivo sensor de retroalimentación es un codificador óptico que emite 400 pulsos/rev. Determine *a*) la velocidad de alimentación y el tiempo para terminar el corte, y *b*) la velocidad de rotación del motor y la razón de pulsos del codificador a la velocidad de alimentación indicada.

39.17. Se usa un servomotor de corriente directa para conducir el eje x de una mesa de máquina para fresado con CN. El motor está acoplado directamente al tornillo guía de la mesa (un giro del motor = un giro del tornillo guía); este último tiene 4 roscas/in. Se usa un codificador óptico para proporcionar la medida de retroalimentación. Se conecta al tornillo guía usando una razón de engranes 1:5 (un giro del tornillo guía se convierte en cinco giros del disco codificador). El codificador óptico emite 125 pulsos por revolución. Para ejecutar cierta instrucción programada, la mesa debe moverse desde el punto (3.5, 1.5) al punto (1.0, 7.2) en una trayectoria en línea recta a una velocidad de alimentación de 7.5 in/min. Para el eje x, determine *a*) la resolución de control de sistema, *b*) la velocidad de rotación del motor y *c*) la frecuencia del tren de pulsos que emite el codificador óptico cuando se obtiene la velocidad de alimentación deseada.

Robótica industrial

39.18. El eje más grande de un robot de coordenadas cartesianas tiene un rango total de 750 mm. Se conduce mediante un sistema de poleas capaz de una precisión mecánica de 0.25 mm y una repetibilidad de ± 0.15 mm. Determine la cantidad mínima de bits requeridos en el registro binario para el eje en la memoria de control del robot.

39.19. Un motor de engranes funciona como la unidad conductora para una articulación lineal de un robot industrial. La articulación debe tener una precisión de 0.25 mm. El motor está conectado a un tornillo guía a través de una reducción de engranes 2:1 (dos giros del motor por un giro del tornillo guía). El paso del tornillo guía es 5.0 mm. Los errores mecánicos en el sistema (debido a holguras del tornillo guía y al reductor de engranes) se representan mediante una distribución normal con una desviación estándar de ±0.05 mm. Especifique la cantidad de ángulos de paso que debe tener el motor para cumplir los requerimientos de exactitud.

39.20. El diseñador de un robot de configuración polar se considera parte de un manipulador que tiene una articulación de rotación conectada a su unión de salida. La unión de salida tiene 25 in de largo y la articulación de rotación tiene un rango de 75°. La exactitud de la combinación articulación-unión expresada como una medida lineal en el extremo de la unión que se produce al rotar la articulación se especifica como 0.030 in. Las imprecisiones mecánicas de la articulación producen un error en la repetibilidad de ±0.030° de rotación. Se supone que la unión es perfectamente rígida, por lo que no hay errores adicionales debido a deflexión. *a*) Demuestre que puede obtenerse la precisión especificada, dado el error de capacidad de repetición. *b*) Determine la cantidad mínima de bits requeridos en el registro binario de la memoria de control del robot para obtener la precisión especificada.

40 TECNOLOGÍA DE GRUPOS Y SISTEMAS FLEXIBLES DE MANUFACTURA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

La tecnología de grupos es un enfoque para la producción de piezas en cantidades medias. Las piezas (y los productos) en este rango de cantidad por lo general se hacen en lotes, y la producción en lotes requiere tiempo de detención para realizar cambios y tiene costos altos por mantener inventarios. La tecnología de grupos (TG) minimiza estas desventajas reconociendo que, aunque las piezas son distintas, también poseen similitudes. La TG explota las similitudes de las piezas utilizando procesos y habilitación de herramientas similares para producirlas. La TG puede implementarse mediante técnicas manuales o automatizadas. Cuando se usa automatización, con frecuencia se aplica el término "sistema flexible de manufactura".

40.1 TECNOLOGÍA DE GRUPOS

La ***tecnología de grupos*** es un enfoque para manufactura en el cual se identifican y agrupan piezas similares para aprovechar sus similitudes en el diseño y la producción. Las similitudes entre las piezas permiten clasificarlas en familias. No es extraño que una fábrica que produce 10 000 piezas diferentes sea capaz de agrupar la mayoría de ellas en 20 o 30

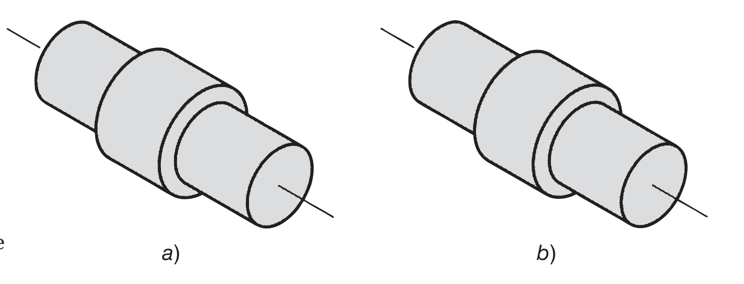


FIGURA 40.1 Dos piezas que tienen forma y tamaño idénticos pero manufactura muy distinta: *a*) 1 000 000 unidades/año, tolerancia = ±0.010 in, acero 1015 CR, chapa de níquel; y *b*) 100 unidades/año, tolerancia = ±0.001 in, acero inoxidable 18-8.

familias de piezas. En cada familia de piezas, los pasos de procesamiento son similares. Cuando estas similitudes se aprovechan en la producción, mejora la eficiencia operativa. En general, el mejoramiento se obtiene organizando las instalaciones de producción en celdas de manufactura. Cada celda se diseña para producir una familia de piezas (o una cantidad limitada de familias de piezas), con lo que se sigue el principio de la especialización de las operaciones. La celda incluye equipo especial de producción, herramientas y soportes personalizados para optimizar la producción de las familias de piezas. En efecto, cada celda se convierte en una fábrica dentro de la fábrica.

40.1.1 Clasificación y codificación de piezas

Una característica central de la tecnología de grupos es la familia de piezas. Una ***familia de piezas*** es un grupo de piezas que poseen similitudes en la forma geométrica y el tamaño, o en los pasos de procesamiento que se usan en su manufactura. Siempre hay diferencias entre las piezas de una familia, pero las similitudes son lo suficientemente cercanas para poder agruparlas en la misma familia. En las figuras 40.1 y 40.2 se muestran dos familias de piezas distintas. Las piezas de la figura 40.1 tienen el mismo tamaño y forma; sin embargo, sus requerimientos de procesamiento son muy distintos debido a las diferencias en el material de trabajo, las cantidades de producción y las tolerancias de diseño.

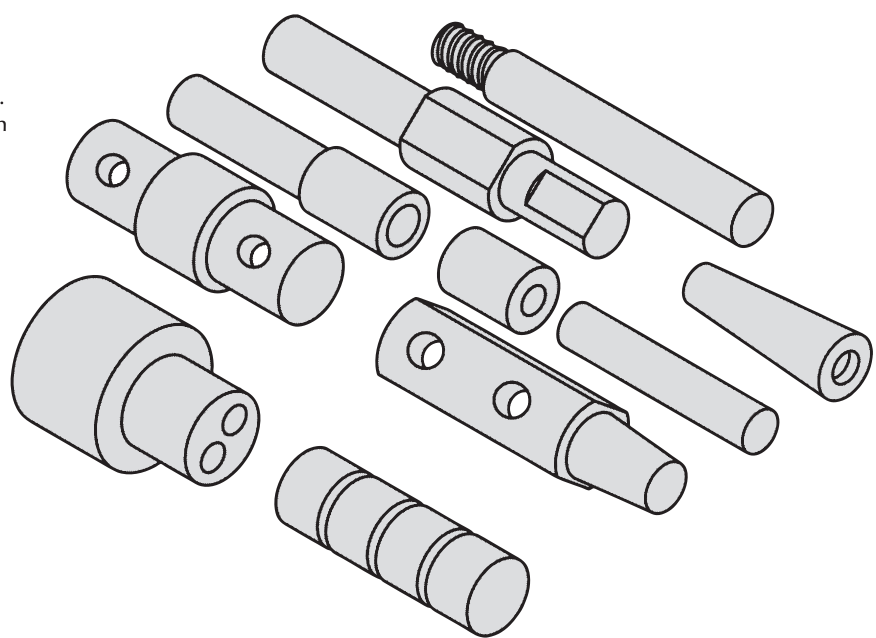


FIGURA 40.2 Diez piezas diferentes en tamaño y forma, pero muy similares en términos de manufactura. Todas las piezas se maquinan con torneado a partir de materia prima cilíndrica; algunas piezas requieren taladrado y/o fresado.

TABLA 40.1 Atributos de diseño y manufactura que se incluyen de manera típica en un sistema de clasificación y codificación de piezas.

Atributos de diseño de piezas		Atributos de manufactura de piezas	
Dimensiones principales	Tipo de material	Proceso principal	Dimensiones principales
Forma básica externa	Función de la pieza	Secuencia de operación	Forma básica externa
Forma básica interna	Tolerancias	Tamaño del lote	Relación longitud/diámetro
Relación longitud/ diámetro	Acabado superficial	Producción anual	Tipo de material
		Máquinas herramienta	Tolerancias
		Herramientas de corte	Acabado superficial

La figura 40.2 muestra varias piezas con configuraciones geométricas sustancialmente diferentes; sin embargo, sus requerimientos de manufactura son muy similares.

Existen varias formas para identificar familias de piezas en la industria. Un método involucra la inspección visual de todas las piezas hechas en la fábrica (o fotografías de las piezas) y el uso del mejor juicio para agruparlas en familias apropiadas. Otro enfoque, denominado ***análisis de flujo de producción***, usa la información que contienen las hojas de ruta (sección 42.1.1) para clasificar las piezas. En efecto, las piezas con pasos de manufacturas similares se agrupan en la misma familia. El método que probablemente sea el más usado, y también el más costoso, es la clasificación y codificación de piezas.

La ***clasificación y codificación de piezas*** implica la identificación de similitudes y diferencias entre las piezas para relacionarlas mediante un esquema de codificación común. La mayoría de los sistemas de clasificación y codificación están entre los siguientes: 1) sistemas basados en atributos del diseño de piezas, 2) sistemas basados en atributos de la manufactura de piezas y 3) sistemas basados tanto en atributos de diseño como de manufactura. Los atributos de diseño y manufactura de las piezas comunes que se usan en los sistemas de clasificación y codificación de piezas se presentan en la tabla 40.1.

Debido a que cada compañía produce un conjunto único de piezas y productos, un sistema de clasificación y codificación que sea satisfactorio para una empresa no es necesariamente apropiado para otra. Cada compañía debe diseñar su propio esquema de codificación. Para dar al lector una idea de lo que esto implica, se presenta la estructura básica de uno de los sistemas de clasificación y codificación de familias en la tabla 40.2. Este sistema fue creado para piezas maquinadas por H. Opitz en Alemania. El número de código básico consiste en nueve dígitos, los cuales contienen datos de diseño y de manufactura. Se diferencian piezas rotacionales y no rotacionales, al igual que diversas características de piezas,

TABLA 40.2 Estructura básica del sistema de clasificación y codificación de piezas de Opitz.

Dígito	Descripción
1	Clase de forma de una pieza: rotatoria contra no rotatoria (figura 22.1). Las pieza rotatorias se clasifican mediante la relación longitud sobre diámetro. Las piezas no rotatorias por longitud, ancho y grosor.
2	Características de forma externa: se distinguen diversos tipos.
3	Maquinado rotatorio. Este dígito se aplica a características de forma interna (por ejemplo, orificios y roscas) en piezas rotatorias y características generales de forma rotatoria para piezas no rotatorias.
4	Superficies maquinadas planas (por ejemplo, fresados planos y ranuras).
5	Orificios auxiliares, dientes de engranes y otras características.
6	Dimensiones-tamaño general.
7	Material de trabajo (por ejemplo, acero, hierro fundido o aluminio).
8	Forma original de la materia prima.
9	Requerimientos de exactitud.

tales como taladrados internos, roscas y dientes de engranes. Los sistemas de clasificación y codificación de piezas se describen a mayor detalle en varias de las referencias [4], [5], [6].

Los beneficios que se citan con frecuencia para un sistema de clasificación y codificación bien diseñado son: 1) facilita la formación de familias de piezas, 2) permite una recuperación rápida de los dibujos del diseño de una pieza, 3) reduce la duplicación del diseño debido a que se recuperan diseños de piezas similares o idénticos y se reutilizan en lugar de diseñarlo desde el principio, 4) promueve la estandarización del diseño, 5) mejora la estimación y la cuantificación de costos, 6) facilita la programación de piezas con control numérico, permitiendo que las piezas nuevas usen el mismo programa de las piezas ya existentes en la misma familia, 7) permite la racionalización y mejoramiento en el diseño de herramientas y soportes y 8) hace posible la planeación de procesos asistidos por computadora (CAPP, por sus siglas en inglés) que se estudian en la sección 42.1.3. Los planes de procesos estándar se correlacionan con números de códigos de familias de piezas, para que se reutilicen o editen los planes de procesos de piezas nuevas de la misma familia.

40.1.2 Manufactura celular

Para explotar por completo las similitudes entre las piezas de una familia, la producción debe organizarse usando celdas de maquinado diseñadas para especializarse en fabricar piezas particulares. Un principio que se usa para diseñar una celda de maquinado de tecnología de grupos es el concepto de piezas compuestas.

Concepto de pieza compuesta Los miembros de una familia de piezas poseen diseño y características de manufactura similares. Por lo general hay una correlación entre las características del diseño de piezas y las operaciones de manufactura que producen tales características. Normalmente los orificios redondos se hacen mediante taladrado, las formas cilíndricas se hacen mediante torneado, y así sucesivamente.

La ***pieza compuesta*** de una familia determinada (no confundirla con una pieza hecha de material compuesto) es una pieza hipotética que incluye todos los atributos de diseño y manufactura de la familia. En general, una pieza individual en la familia tendrá algunas de las características que distinguen a la familia, pero no todas. Una celda de producción diseñada para una familia de piezas incluiría las máquinas requeridas para hacer la pieza compuesta. Tal celda sería capaz de producir cualquier elemento de la familia con sólo omitir las operaciones que correspondieran a las características que no posee la pieza particular. La celda también se diseñaría para permitir variaciones de tamaño dentro de la familia, al igual que variaciones en las características.

A modo de ilustración, considere la pieza compuesta de la figura 40.3a). Representa una familia de piezas rotatorias o giratorias con características definidas en el inciso *b*) de la figura. Cada característica está asociada con cierta operación de maquinado, como se resume en la tabla 40.3. También se diseñaría una celda de maquinado para producir esta

FIGURA 40.3 Concepto de una pieza compuesta: *a*) la pieza compuesta para una familia de piezas rotatorias maquinadas y *b*) las características individuales de la pieza compuesta.

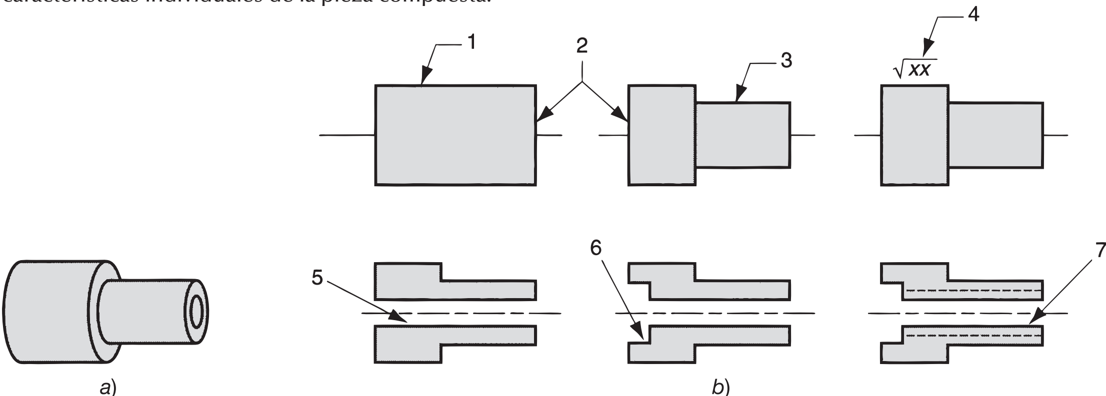


TABLA 40.3 Características de diseño de la pieza compuesta de la figura 40.3 y las operaciones de manufactura requeridas para formar tales características.

Etiqueta	Característica de diseño	Operación de manufactura correspondiente
1	Cilindro externo	Torneado
2	Cara del cilindro	Careado
3	Paso cilíndrico	Torneado
4	Superficie lisa	Esmerilado cilíndrico externo
5	Orificio axial	Taladrado
6	Abocardado	Perforado, abocardado
7	Roscas internas	Roscado

familia de piezas con la capacidad de realizar todas las operaciones que aparecen en la última columna de la tabla.

Diseño de celdas de maquinado Las celdas de maquinado se clasifican de acuerdo con la cantidad de máquinas y nivel de automatización. Las posibilidades son: *a*) máquina única, *b*) varias máquinas con manejo manual, *c*) varias máquinas con manejo mecanizado, *d*) celda flexible de manufactura y *e*) sistema flexible de manufactura. Estas celdas de producción se muestran esquemáticamente en la figura 40.4.

La ***celda de máquina única*** tiene una máquina que se opera en forma manual. La celda también incluiría soportes y herramientas para permitir las variaciones de características y tamaños dentro de la familia de piezas que produce la celda. La celda de maquinado requerida para la familia de piezas de la figura 40.3 probablemente sería de este tipo.

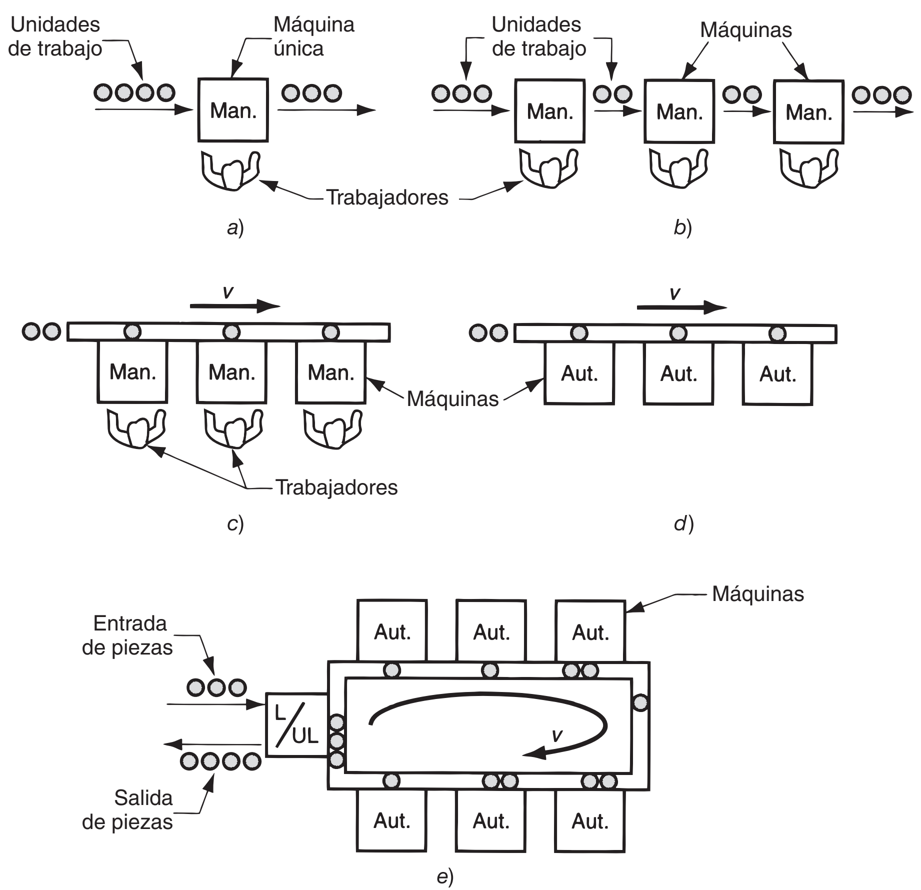


FIGURA 40.4 Tipos de celdas de maquinado para tecnología de grupos: *a*) máquina única, *b*) máquinas con manejo manual, *c*) máquinas con manejo mecanizado, *d*) celda flexible de manufactura y *e*) sistema flexible de manufactura. Man. = operación manual; Aut. = estación automatizada.

Las ***celdas de máquinas múltiples*** tienen dos o más máquinas que se operan en forma manual. Éstas se distinguen por el método de manejo de piezas de trabajo en la celda: manual o mecanizado. El manual significaría que los trabajadores mueven las piezas dentro de la celda, por lo general los operadores de máquinas. El mecanizado se refiere a la transferencia de piezas de una máquina a la siguiente. Esto puede deberse al tamaño y al peso de las piezas hechas en la celda o simplemente para aumentar la velocidad de producción. El diagrama muestra el flujo de trabajo como lineal; también son posibles otras distribuciones, como en forma de U o en ciclo.

Las ***celdas flexibles de manufactura*** y los ***sistemas flexibles de manufactura*** consisten en máquinas automatizadas con manejo automatizado. Dada la naturaleza especial de estos sistemas de producción y su importancia, la sección 40.2 está completamente dedicada a su análisis.

40.1.3 Beneficios y problemas en la tecnología de grupos

Esta tecnología proporciona beneficios sustanciales a las compañías, si éstas tienen la disciplina y perseverancia para implementarla. Los beneficios potenciales incluyen: 1) la TG promueve la estandarización en las herramientas, en la instalación de soportes y en las configuraciones; 2) se reduce el manejo de material porque las piezas se mueven dentro de una celda de maquinado y no dentro de toda la fábrica; 3) los calendarios de producción pueden ser más sencillos; 4) se reduce el tiempo de producción; 5) se reduce el trabajo en proceso; 6) se simplifica la planeación de los procesos; 7) por lo general, mejora la satisfacción de los trabajadores cuando laboran en una celda de tecnología de grupos y 8) se obtiene un trabajo de mayor calidad usando tecnología de grupos.

Existen varios problemas para llevar a cabo la tecnología de grupos. Un problema obvio es el reordenamiento de las máquinas para producción de la planta en las celdas de maquinado adecuadas. Se requiere tiempo para planear y realizar este reordenamiento y las máquinas no producen durante el cambio. El mayor problema para iniciar un programa de TG es identificar las familias de piezas. Si la planta hace 10 000 piezas distintas, la revisión de todos los dibujos de piezas y su agrupación en familias es una tarea enorme que consume una cantidad importante de tiempo.

40.2 SISTEMAS FLEXIBLES DE MANUFACTURA

Un ***sistema flexible de manufactura*** (FMS, por sus siglas en inglés) es una celda de maquinado con TG altamente automatizada que consiste en un grupo de estaciones de procesamiento (por lo general, máquinas herramienta CNC) interconectadas mediante un sistema automatizado de manejo y almacenamiento de material y controladas por medio de un sistema integrado de computadoras. Un FMS es capaz de procesar una amplia variedad de estilos de piezas simultáneamente bajo un programa de control numérico en diferentes estaciones de trabajo.

Un FMS se basa en los principios de la tecnología de grupos. Ningún sistema de manufactura puede ser completamente flexible. No es posible producir un rango infinito de productos. Existen límites en el grado de flexibilidad que puede incorporarse en un FMS. En consecuencia, un sistema flexible de manufactura se diseña para producir piezas (o productos) dentro de un rango de estilos, tamaños y procesos. En otras palabras, es capaz de producir una familia de piezas única o un rango limitado de familia de piezas.

40.2.1 Flexibilidad y sistemas automatizados de manufactura

Éstos varían en términos de la cantidad de máquinas herramienta y el nivel de flexibilidad. Cuando el sistema sólo tiene algunas máquinas, se usa el término ***celda flexible de manufactura*** (FMC, por sus siglas en inglés). Tanto las celdas como los sistemas están muy auto-

matizados y se controlan por computadora. Las diferencias entre un FMS y una FMC no están siempre claras, pero en ocasiones se basan en la cantidad de máquinas (estaciones de trabajo) que incluyen. El sistema flexible de manufactura consta de cuatro o más máquinas, mientras que una celda flexible de manufactura consta de tres máquinas o menos [5]. Sin embargo, esta distinción no está aceptada universalmente.

Algunos sistemas y celdas altamente automatizados no son flexibles y esto produce confusión en la terminología. Por ejemplo, una línea de transferencia (sección 41.3) es un sistema altamente automatizado para manufactura, pero está limitado a la producción masiva de un estilo de pieza, por lo cual no es un sistema flexible. Para desarrollar el concepto de flexibilidad en un sistema de manufactura, considere una celda que posee dos máquinas herramientas CNC, en las cuales un robot industrial carga y descarga desde un carrusel de piezas, tal vez en un ordenamiento como el que se muestra en la figura 40.5. La celda opera sin vigilancia durante largos periodos. En forma periódica, un trabajador debe descargar piezas terminadas del carrusel y sustituirlas con piezas de trabajo nuevas. Ésta es verdaderamente una celda automatizada de manufactura, pero ¿es una celda flexible de manufactura? Podría decirse que sí, que su flexibilidad consiste en las máquinas herramienta CNC que pueden programarse para maquinar distintas configuraciones de piezas como cualquier otra máquina CNC. Sin embargo, si la celda sólo funciona en un modo por lotes, en el cual se produce el mismo estilo de pieza en varias docenas (o varios cientos) de unidades, esto no puede calificarse como manufactura flexible.

Para calificar a un sistema de manufactura como flexible debe cumplir varios criterios. Las pruebas de flexibilidad en un sistema de producción automatizada son la capacidad de 1) procesar diferentes estilos de piezas, pero no por el modelo de lotes, 2) aceptar cambios en el programa de producción, 3) responder en forma inmediata cuando se presenten averías y errores del equipo en el sistema y 4) aceptar la introducción de nuevos diseños de piezas. Estas capacidades hacen posible el uso de una computadora central que controla y coordina los componentes del sistema. Los criterios más importantes son: el 1) y el 2); los criterios 3) y 4) son más suaves y pueden implementarse en distintos niveles de sofisticación.

Si el sistema automatizado no cumple estos cuatro criterios, no debe clasificarse como un sistema o celda flexible de manufactura. De regreso a la ilustración, la celda de trabajo robótica cumpliría el criterio si: 1) maquinara diferentes configuraciones de piezas en una mezcla y no por lotes, 2) permitiera cambios en el programa de producción y en la mezcla de piezas, 3) continuara funcionando, incluso si se descompusiera una máquina (por ejemplo, si mientras se repara la máquina descompuesta, su trabajo se reasignará temporalmente a otra máquina) y 4) conforme se implantaran nuevos diseños de piezas, se escribieran fuera de línea programas de piezas con CN y después se copiaran al sistema para su ejecución. Esta cuarta capacidad también requiere que las herramientas en las

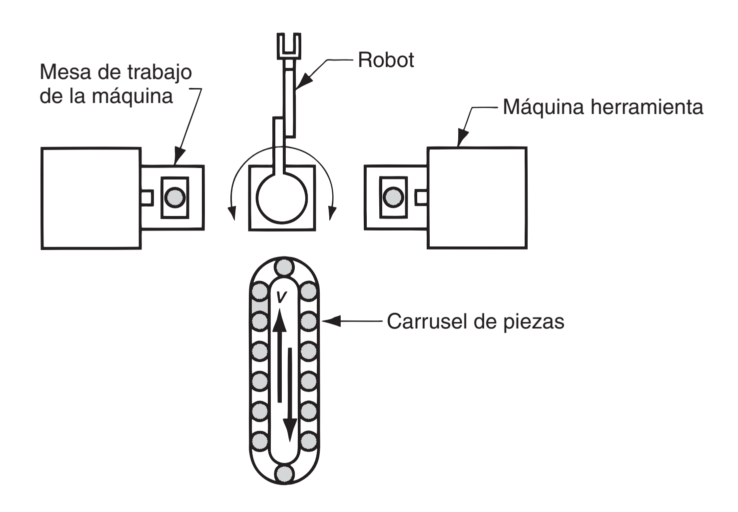


FIGURA 40.5 Una celda de manufactura automatizada con dos máquinas herramienta y un robot, ¿es una celda flexible?

máquinas CNC, al igual que el extremo actuador del robot, sean convenientes para el nuevo diseño de piezas.

40.2.2 Integración de los componentes de un sistema flexible de manufactura

Un FMS consiste en un hardware y un software que deben integrarse en una unidad eficiente y confiable. También incluye personal humano. En esta sección se examinarán estos componentes y la manera en que se integran.

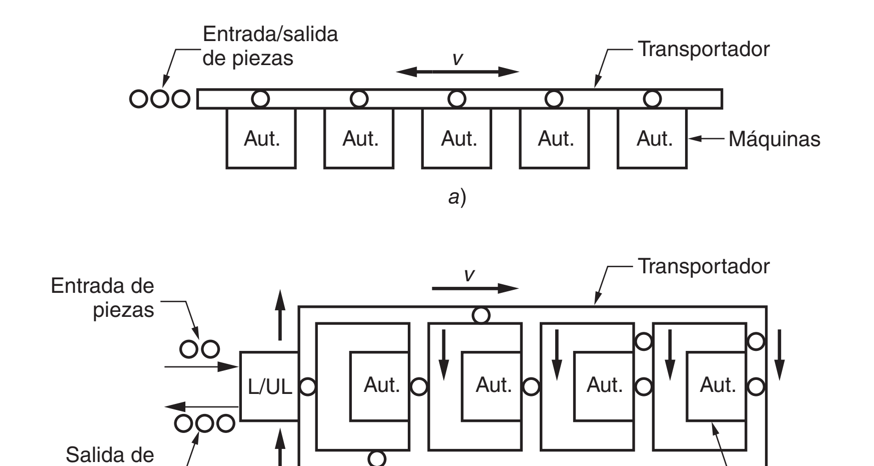
Componentes de hardware Un sistema flexible de manufactura incluye estaciones de trabajo, un sistema de manejo de material y una computadora de control central. Las estaciones de trabajo incluyen máquinas CNC en un sistema de tipo maquinado, además de estaciones de inspección, de limpieza de piezas y otras, según se necesiten. A menudo se instala un sistema transportador con chip central bajo el nivel del piso.

El sistema de manejo de materiales es el medio para mover las piezas entre las estaciones e incluye una capacidad limitada para almacenar piezas. Entre los sistemas de manejo para la manufactura automatizada están los transportadores de rodillos, los carros enganchados en el piso, los vehículos guiados en forma automática y los robots industriales. El tipo más apropiado depende del tamaño y la configuración geométrica de piezas, al igual que de factores relacionados con la economía y la compatibilidad con otros componentes del FMS. Con frecuencia, las piezas no rotatorias se mueven en un FMS sobre "tarimas" fijas, por lo que éstas están diseñadas para el sistema de manejo particular, y los soportes se diseñan para alojar las diversas configuraciones geométricas de piezas en la familia. Las piezas rotatorias se manejan mediante robots, si el peso no es un factor restrictivo.

El sistema de manejo establece la distribución básica del FMS. Pueden distinguirse cinco tipos de distribución: 1) en línea, 2) en ciclo, 3) en escalera, 4) a campo abierto y 5) celda centrada en un robot. Los tipos 1, 3 y 4 se muestran en la figura 40.6. Los tipos 2 y 5 se muestran en las figuras 40.4e) y 40.5, respectivamente. El ***diseño en línea*** usa un sistema de transferencia lineal para mover las piezas entre las estaciones de procesamiento y las de carga/descarga. El sistema de transferencia en línea generalmente tiene capacidad de movimiento en dos direcciones; de lo contrario, el FMS opera en forma muy parecida a una línea de transferencia, y los diferentes estilos de piezas hechos en el sistema deben seguir la misma secuencia básica de procesamiento debido al flujo en una dirección. La ***distribución en ciclo*** consiste en un transportador o ciclo con estaciones de trabajo ubicadas en su periferia. Esta configuración permite cualquier secuencia de procesamiento, debido a que es posible acceder a cualquier estación desde otra. Esto también se aplica a la ***distribución en escalera***, en la cual las estaciones de trabajo se ubican en los peldaños de la escalera. La ***distribución a campo abierto*** es la configuración de FMS más compleja y consiste en varios ciclos enlazados. Por último, una celda centrada en un robot consiste en un robot cuyo volumen de trabajo incluye las posiciones de carga/descarga de las máquinas en la celda.

El FMS también incluye una computadora central que hace interfaz con otros componentes del hardware. Además de la computadora central, las máquinas individuales y otros componentes generalmente tienen microcomputadoras como sus unidades de control individual. La función de la computadora central es coordinar las actividades de los componentes para obtener una operación general del sistema que sea continuo. Esta función se realiza por medio del software de aplicación.

Software de un FMS y funciones de control El software de un FMS consiste en módulos asociados con las diversas funciones que ejecuta el sistema de manufactura. Por ejemplo, una función implica cargar programas de piezas de CN a las máquinas herramienta individuales; otra función se relaciona con el control del sistema de manejo de material; otra se refiere a la administración de las herramientas, y así sucesivamente. En la tabla 40.4 presenta una lista de las funciones incluidas en la operación de un FMS típico. Con cada función se asocian uno o más módulos del software. En una instalación determinada puede usarse



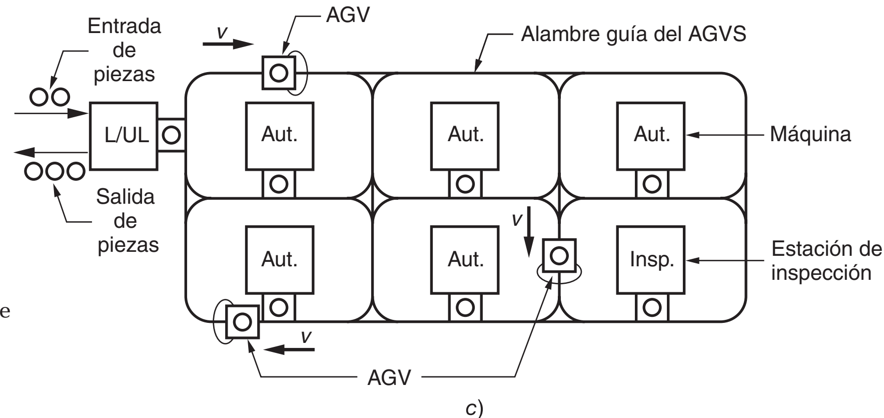


FIGURA 40.6 Tres de los cinco tipos de distribución de FMS: a) en línea, b) en escalera y c) a campo abierto. Claves: Aut. = estación automatizada; L/UL = estación de carga/descarga; Insp. = estación de inspección; AGV = vehículo guiado automáticamente; AGVS = sistema vehicular guiado automáticamente.

TABLA 40.4 Funciones típicas de computadora instrumentadas mediante módulos de software de aplicación en un sistema flexible de manufactura.

Función	Descripción
Programación de piezas por CN	Desarrollo de programas de CN para piezas nuevas introducidas en el sistema. Esto incluye un paquete de lenguaje, como APT.
Control de producción	Mezcla de productos, programación de maquinado y otras funciones de planeación.
Copia de programas por CN	Los comandos del programa de piezas deben copiarse a las estaciones individuales desde la computadora central.
Control de máquina	Las estaciones de trabajo individuales requieren controles, usualmente control numérico por computadora.
Control de pieza de trabajo	Monitoreo del estado de cada pieza de trabajo en el sistema, el estado de los soportes de tarima, los pedidos en los soportes de las tarimas para carga/descarga.
Administración de herramientas	Las funciones incluyen control de inventario de herramientas, estado de las herramientas en relación con su ciclo de vida, el cambio y reformado de herramientas, y el transporte desde y hacia el esmerilado de herramientas.
Control de transporte	Programación y control del sistema de manejo de piezas de trabajo.
Administración del sistema	Compilación de los reportes de administración sobre el desempeño (utilización, cuenta de piezas, velocidades de producción, etc.); a veces se incluye la simulación de un FMS.

términos diferentes a los de la tabla. Las funciones y los módulos son, en gran parte, para una aplicación específica.

Mano de obra humana Éste es un componente adicional en la operación de un sistema flexible de manufactura. Entre las actividades que realizan los trabajadores están: 1) cargar y descargar piezas del sistema, 2) cambiar y preparar las herramientas de corte, 3) dar mantenimiento y reparar el equipo, 4) programación de piezas con control numérico, 5) programación y operación del sistema de computadoras y 6) administración general del sistema.

40.2.3 Aplicaciones de los sistemas flexibles de manufactura

Ésta es una forma típica para usar una producción de volumen medio y variedad intermedia. Si la pieza o el producto se hace en grandes cantidades sin variaciones de estilo, es más conveniente una línea de transferencia o un sistema similar de producción dedicada. Si las piezas se hacen en volumen bajo y variedad alta, sería más conveniente el control numérico o incluso métodos manuales. Estas características de aplicaciones se resumen en la figura 40.7.

Los sistemas flexibles de maquinado son las aplicaciones más comunes en la tecnología de un FMS. Debido a las flexibilidades y capacidades inherentes al control numérico por computadora, es posible conectar varias máquinas herramienta de CNC a una pequeña computadora central y diseñar métodos automatizados para transferir las piezas de trabajo entre las máquinas. En la figura 40.8 se muestra un sistema flexible de maquinado que consta de cinco centros de maquinado de CNC y un sistema de transferencia en línea para recoger piezas de una estación central de carga/descarga y moverlas a las estaciones de maquinado adecuadas.

Además de los sistemas de maquinado, se han implantado otros tipos de sistemas flexibles de manufactura, aunque el estado de la tecnología en estos procesos no ha permitido su implementación como en el maquinado. Los otros tipos de sistemas incluyen el ensamble, la inspección, el procesamiento de láminas metálicas (perforado, recorte, doblado y formado) y el forjado.

La mayoría de la experiencia en los sistemas flexibles de manufactura se ha obtenido en el área de maquinado. Para los sistemas flexibles de maquinado, los beneficios que, por

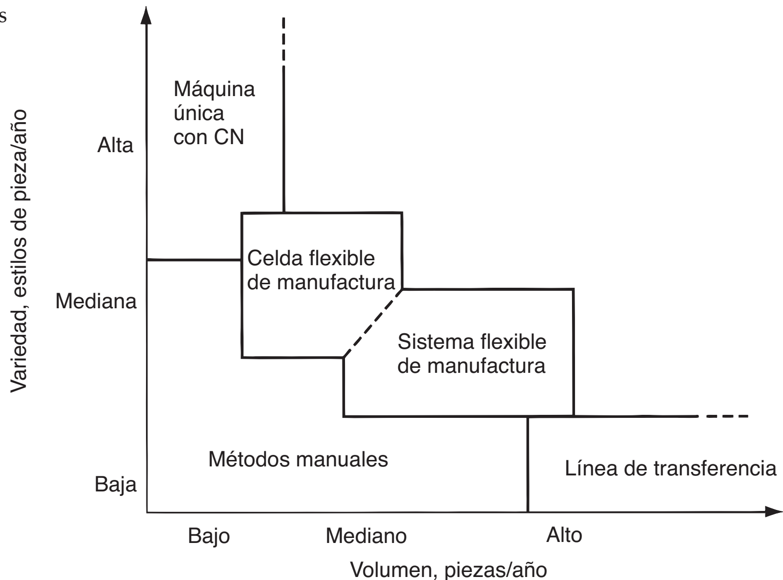


FIGURA 40.7 Características de la aplicación de sistemas y celdas flexibles de manufactura en relación con otros tipos de sistemas de producción.

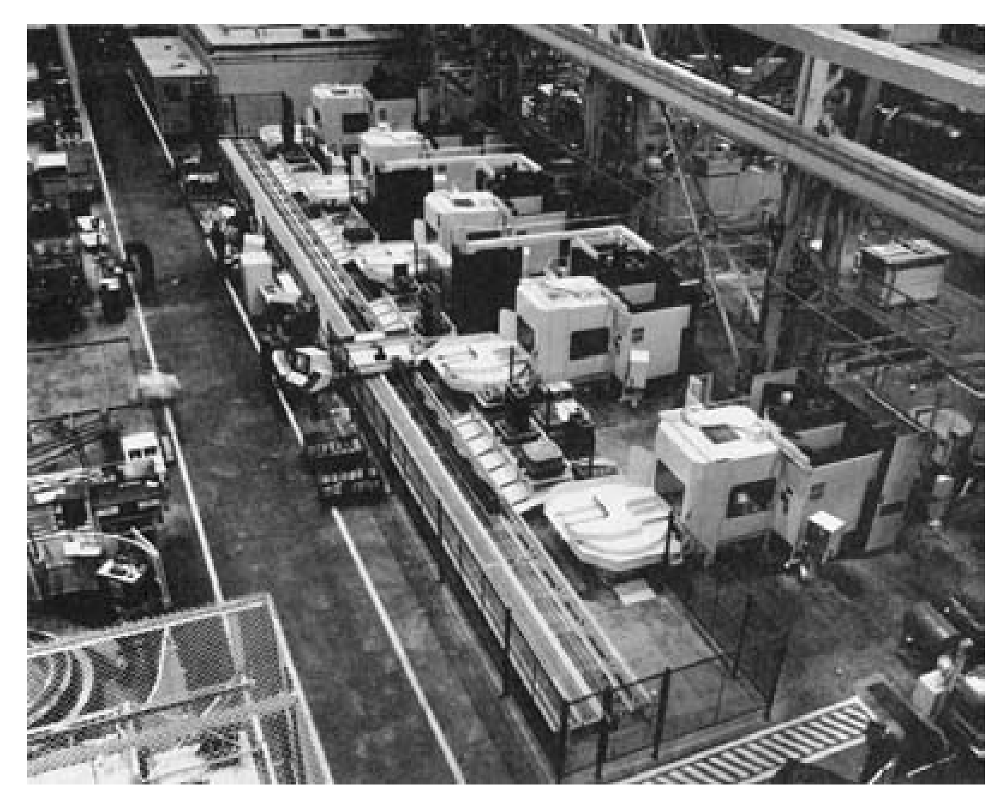


FIGURA 40.8 Un sistema flexible de manufactura de cinco estaciones. (Foto cortesía de Cincinnati Milacron).

lo general, proporcionan son: 1) mayor utilización de máquinas que un taller especializado convencional, utilizaciones relativas entre 40 y 50% para las operaciones convencionales de tipo por lotes, y alrededor de 75% para un FMS debido a un mejor manejo del trabajo, distribuciones fuera de línea y programación mejorada, 2) menor trabajo en proceso debido a la producción continua, en vez de la producción por lotes, 3) tiempos de manufactura más cortos y 4) mayor flexibilidad en el programa de producción

REFERENCIAS

[1] Black, J. T., ***The Design of the Factory with a Future***, McGraw-Hill, Nueva York, 1990.

[2] Black, J. T., "An Overview of Cellular Manufacturing Systems and Comparison to Conventional Systems", ***Industrial Engineering***, noviembre de 1983, pp. 36-84.

[3] Chang, T-C., Wysk, R. A. y Wang, H-P., ***Computer-Aided Manufacturing,*** 2a. ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1997.

[4] Gallagher, C. C. y Knight, W. A., ***Group Technology,*** Butterworth & Co., Ltd., Londres, 1973.

[5] Groover, M. P. ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing***, 2a. ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

[6] Ham, I., Hitomi, K. y Yoshida, T., ***Group Technology,*** Kluwer Nijhoff Publishers, Hingham, Mass., 1985.

[7] Houtzeel, A., "The Many Faces of Group Technology", ***American Machinist,*** enero de 1979, pp. 115-120.

[8] Luggen, W. W., ***Flexible Manufacturing Cells and Systems***, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1991.

[9] Maleki, R. A., ***Flexible Manufacturing Systems: The Technology and Management***, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1991.

[10] Moodie, C., Uzsoy, R. y Yih, Y., ***Manufacturing Cells: A Systems Engineering View,*** Taylor & Francis, Ltd., Londres, U.K., 1995.

[11] Snead, C. S., ***Group Technology: Foundation for Competitive Manufacturing,*** Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1989.

[12] Weber, A., "Is Flexibility a Myth?", ***Assembly***, mayo de 2004, pp. 50-59.

PREGUNTAS DE REPASO

40.1. Defina tecnología de grupos.
40.2. ¿Qué es una familia de piezas?
40.3. Defina manufactura celular.
40.4 ¿Qué es el concepto de pieza compuesta en la tecnología de grupos?
40.5. Mencione algunos de los diseños posibles para celdas de maquinado en la tecnología de grupos.
40.6. ¿Qué es un sistema flexible de manufactura?
40.7. ¿Qué hace flexible a un sistema automatizado de manufactura?
40.8. Mencione el software y las funciones de control para un FMS.
40.9. Identifique algunas de las aplicaciones de la tecnología de un FMS.
40.10. ¿Cuáles son las ventajas de la tecnología de un FMS en comparación con las operaciones por lote convencionales?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 12 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

40.1. El análisis de flujo de producción es un método para identificar partes de la familia que utilizan datos de las siguientes fuentes: *a*) lista de materiales, *b*) dibujos de ingeniería, *c*) programa maestro, *d*) programa de producción o *e*) hojas de ruta.

40.2. ¿En cuál de los siguientes tipos de atributos de piezas se basa la mayoría de los sistemas de clasificación y codificación de piezas? (dos mejores respuestas): *a*) tasa de producción anual, *b*) fecha de diseño, *c*) diseño, *d*) manufactura y *e*) peso.

40.3. ¿Cuáles de los siguientes son atributos de diseño que pueden incluirse en un sistema de clasificación y codificación de piezas? (tres mejores respuestas): *a*) producción anual, *b*) tamaño de lotes, *c*) razón de longitud sobre diámetro, *d*) proceso principal, *e*) dimensión de las piezas y *f*) tolerancias.

40.4. ¿Cuál es la línea divisoria entre una celda de manufactura y un sistema flexible de manufactura? *a*) dos máquinas, *b*) cuatro máquinas o *c*) seis máquinas.

40.5. Una máquina capaz de producir estilos de piezas diferentes en un modo de operación por lotes califica como un sistema flexible de manufactura: *a*) ¿verdadero o *b*) falso?

40.6. ¿Cuál de los siguientes sistemas determina principalmente la distribución física de un sistema flexible de manufactura?: *a*) sistema de computadoras, *b*) sistema de manejo de materiales, *c*) familia de piezas, *d*) equipo de procesamiento o *e*) peso de las piezas procesadas.

40.7. En general, ¿en cuál de los siguientes tipos de piezas en un sistema flexible de maquinado pueden manejarse con mayor facilidad los robots industriales?: *a*) piezas pesadas, *b*) piezas metálicas, *c*) piezas no rotatorias, *d*) piezas plásticas o *e*) piezas rotatorias.

40.8. ¿En cuál de las siguientes áreas se aplican generalmente los sistemas y las celdas flexibles de manufactura?: *a*) producción de variedad alta, volumen bajo, *b*) variedad baja, *c*) volumen bajo, *d*) producción masiva o *e*) producción de volumen mediano y variedad mediana.

40.9. ¿Cuál de las tecnologías siguientes se asocia de manera más estrecha con los sistemas flexibles de maquinado?: *a*) láser, *b*) visión de máquina, *c*) líneas de ensamble manual, *d*) control numérico o *e*) líneas de transferencia.

41 LÍNEAS DE PRODUCCIÓN

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Las líneas de producción son una clase importante en los sistemas de manufactura cuando deben hacerse grandes cantidades de productos idénticos o similares. Están diseñados para situaciones donde el trabajo total que debe realizarse en la pieza o producto consiste en muchos pasos separados. Entre los ejemplos están los productos ensamblados (por ejemplo, los automóviles y los aparatos eléctricos), así como las piezas maquinadas que se producen en forma masiva, en las cuales se requieren múltiples operaciones de maquinado (por ejemplo, bloques de motores y receptáculos de transmisiones). En una línea de producción, el trabajo total se divide en tareas pequeñas y se asignan trabajadores o máquinas para realizar estas actividades con gran eficiencia. Gran parte del crédito para la implantación y refinamiento de la línea de producción se debe a Henry Ford y su equipo de ingeniería en la Ford Motor Company a principios del siglo XX (nota histórica 41.1 en la página 926).

Por cuestiones de organización, las líneas de producción se dividieron en dos tipos básicos: líneas de ensamble manual y líneas de producción automatizadas. Sin embargo, son frecuentes las líneas híbridas con operaciones tanto manuales como automatizadas. Antes de examinar estos sistemas, se considerarán algunos de los aspectos generales involucrados en el diseño y operación de una línea de producción.

41.1 FUNDAMENTOS DE LAS LÍNEAS DE PRODUCCIÓN

Una ***línea de producción*** consiste en una serie de estaciones de trabajo ordenadas para que el producto pase de una estación a la siguiente y en cada ubicación se realice una parte

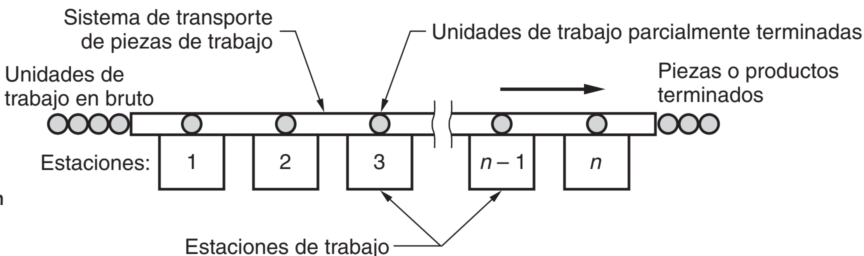


FIGURA 41.1 Configuración general de una línea de producción.

del trabajo total. Véase la figura 41.1. La velocidad de producción de la línea se determina por medio de su estación más lenta. Las estaciones de trabajo con ritmos más rápidos que el de la estación más lenta estarán limitadas por este cuello de botella. La transferencia del producto a lo largo de la línea por lo general se realiza mediante un dispositivo de transferencia mecánica o sistema de transporte, aunque algunas líneas manuales simplemente pasan entre las estaciones el producto a mano. Las líneas de producción se asocian con la producción masiva. Si las cantidades del producto son muy grandes y el trabajo se va a dividir en tareas separadas que pueden asignarse a estaciones de trabajo individuales, entonces una línea de producción es el sistema de manufactura más apropiado.

41.1.1 Variaciones de productos

Las líneas de producción se diseñan para afrontar las variaciones en los modelos de los productos, siempre y cuando las diferencias entre ellos no sean demasiado grandes (una variedad suave de productos, como se define en la sección 1.1.2). Pueden distinguirse tres tipos de líneas: 1) de modelo único, 2) de modelo por lotes y 3) de modelo mixto. Una ***línea de modelo único*** produce sólo un modelo y no hay variaciones en él. Por lo tanto, las tareas que se realizan en cada estación son iguales sobre todas las unidades de productos.

Las líneas de modelo por lotes y de modelo mixto se diseñan para producir dos o más modelos del producto en la misma línea, pero usan diferentes enfoques para enfrentar las variaciones. Como lo sugiere su nombre, una ***línea de modelo por lotes*** produce cada modelo en lotes. Las estaciones de trabajo se configuran para producir la cantidad deseada del primer modelo y después se reconfiguran para producir la cantidad requerida del modelo siguiente, y así sucesivamente. Con frecuencia, los productos ensamblados usan este enfoque cuando la demanda de cada producto es media. En este caso, la economía favorece el uso de una línea de producción para varios productos en vez de usar líneas separadas para cada modelo.

La "configuración de la estación de trabajo" se refiere a la asignación de tareas a una estación dada en la línea, las herramientas especiales necesarias para realizar las tareas y la distribución física de la estación. En general, los modelos hechos en la línea son similares y, por lo tanto, las tareas para hacerlos también son semejantes. Sin embargo, existen tales diferencias entre los modelos que se requiere una secuencia de tareas distinta, y tal vez las herramientas usadas en una estación de trabajo para el último modelo no sean las mismas que se requieren para el siguiente. Un modelo puede requerir más tiempo total que otro, lo que obliga a la línea a funcionar a un ritmo más lento. Asimismo, puede requerirse capacitación adicional o nuevo equipo para la producción de un modelo nuevo. Por estas razones, se requieren cambios en la configuración de una estación de trabajo antes de que empiece la producción de un modelo nuevo. Estas modificaciones producen tiempos muertos (tiempo de producción perdido) en una línea de modelos por lotes.

Una ***línea de modelo mixto*** también produce varios modelos; sin embargo, éstos se entremezclan en la misma línea, en lugar de producirse por lotes. Mientras un modelo particular se trabaja en una estación, se procesa uno distinto en la siguiente estación. Cada estación está equipada con las herramientas necesarias y es capaz de realizar las tareas que se requieren para producir cualquier modelo que se requiera. Muchos productos para el consumidor se ensamblan en líneas de modelo mixto. Los principales ejemplos son los

automóviles y los aparatos eléctricos, que se caracterizan por variaciones significativas entre modelos y las opciones disponibles.

Las ventajas de una línea de modelo mixto sobre una por lotes son: 1) se minimizan los tiempos muertos entre modelos; 2) se evitan altos inventarios de algunos modelos cuando hay escasez de otros; y 3) las velocidades de producción y las cantidades de los modelos aumentan y descienden de acuerdo con los cambios en la demanda. Por otra parte, el problema de asignar tareas a las estaciones de trabajo para que todas compartan una misma carga de trabajo es más complejo en una línea de modelo mixto. La programación (determinar la secuencia de modelo) y la logística (llevar las piezas correctas a cada estación de trabajo para el modelo que está en esa estación) son más difíciles en este tipo de línea.

41.1.2 Métodos de transporte de trabajo

Existen distintas formas de mover las unidades de trabajo de una estación a la siguiente. Las dos categorías básicas son manual y mecanizada.

Métodos manuales de transporte de trabajo Éstos implican pasar las unidades de trabajo entre las estaciones en forma manual y se asocian con las líneas de ensamble manual. En algunos casos, el producto de cada estación se recopila en una caja o una charola de carga, cuando la caja está llena se mueve a la siguiente estación. Esto puede dar por resultado una cantidad significativa de inventario dentro de los procesos, lo cual no es deseable. En otros casos, las unidades de trabajo se mueven en forma individual a lo largo de una tabla plana o un transportador sin energía (por ejemplo, un transportador de rodillos). Cuando se termina una tarea en cada estación, el trabajador simplemente empuja la unidad a la siguiente estación. En general se permite un espacio para recolectar una o más unidades entre las estaciones, con lo que se relaja el requerimiento de que todos los trabajadores ejecuten sus respectivas tareas en forma sincronizada.

Un problema asociado con los métodos manuales de transporte de trabajo es la dificultad para controlar la velocidad de producción en la línea. Los trabajadores tienden a trabajar a un ritmo más lento, a menos que se les proporcione un medio mecánico para marcar el ritmo.

Métodos mecanizados de transporte de trabajo Por lo general, se usan sistemas mecánicos de potencia para mover unidades de trabajo a lo largo de una línea de producción. Éstos incluyen dispositivos para levantar y cargar, mecanismos para levantar y colocar, transportes que utilizan energía eléctrica (por ejemplo, transportadores de cadena colgante, cintas transportadoras y transportadores de cadena al piso) y otro equipo de manejo de materiales, algunas veces se combinan varios tipos en la misma línea. En este texto no se pretende describir los tipos de equipo para el manejo de material disponibles, pero resulta conveniente identificar los tres tipos de sistemas de transferencia de piezas de trabajo que se usan en las líneas de producción: 1) transferencia continua, 2) transferencia sincrónica y 3) transferencia asincrónica. Estos sistemas de transferencia se implantan mediante diversos tipos de equipo.

Los ***sistemas de transferencia continua*** consisten en un transportador que se mueve continuamente y opera a una velocidad constante v_c. El sistema de transferencia continua es más común en las líneas de ensamble manual. Se distinguen dos casos: 1) las piezas se fijan al transportador o 2) pueden retirarse del transportador. En el primer caso, generalmente el producto es grande y pesado (por ejemplo, automóviles y lavadoras), y no puede removerse de la línea. Por lo tanto, el trabajador debe rodear el transportador móvil para completar la tarea asignada en tal unidad mientras está en la estación. En el segundo caso, el producto es lo suficientemente pequeño para removerse del transportador y facilitar el trabajo en cada estación. En este tipo de disposición, se pierden algunos de los beneficios del ritmo, puesto que no se requiere que cada trabajador termine las tareas asignadas dentro de un periodo fijo. Por otra parte, este caso permite una mayor flexibilidad a cada trabajador para enfrentar los problemas técnicos que pueda encontrar en una unidad de trabajo particular.

En los ***sistemas de transferencia sincrónica*** las unidades de trabajo se mueven simultáneamente entre las estaciones con un movimiento rápido y discontinuo. Estos sistemas se conocen con el nombre de ***transferencia intermitente***, la cual caracteriza el tipo de movimiento que experimentan las unidades de trabajo. La transferencia sincrónica incluye la colocación del trabajo en las estaciones, y es un requerimiento para las líneas automatizadas que usan este modo de transferencia. Ésta no es común para líneas manuales debido al ritmo tan rígido que involucra. La tarea en cada estación debe terminarse dentro del tiempo de ciclo permitido o el producto saldrá de la estación como una unidad incompleta. Esta disciplina rítmica rígida presiona a los trabajadores, lo cual es indeseable. En contraste, este ritmo de trabajo se presta para una operación automatizada.

La ***transferencia asincrónica*** permite que cada unidad de trabajo salga de la estación actual cuando se termina el procesamiento. Cada unidad se mueve en forma independiente y no en forma sincrónica. Por lo tanto, en cualquier momento, algunas unidades en la línea se mueven entre estaciones, mientras que otras están colocadas en ellas. En ocasiones, este tipo de transferencia se denomina un sistema de "carga y liberación". Con la operación de un sistema de transferencia asincrónica se asocia el uso táctico de colas entre las estaciones. Se permite que se formen pequeñas colas de unidades de trabajo enfrente de cada estación, de modo que las variaciones en los tiempos de tareas de los trabajadores se promedien y las estaciones siempre tengan trabajo pendiente para ellas. La transferencia asincrónica se usa tanto en sistemas de producción manual como automatizada.

41.1.3 Determinación del número de trabajadores requeridos

Las líneas de producción se usan para productos con alta demanda. Pueden desarrollarse ecuaciones para determinar el número requerido de trabajadores y estaciones de trabajo en una línea de producción, con el propósito de cumplir una demanda anual dada. Suponga que el problema consiste en diseñar una línea de modelo único para satisfacer la demanda anual de un producto. La administración debe decidir cuántos turnos de trabajadores por semana operarán la línea y la cantidad de horas por turno. Si se suponen 50 semanas por año, entonces la velocidad de producción requerida por hora de la línea se determinará mediante:

$$R_p = \frac{D_a}{50 S_w H_{sh}} \tag{41.1}$$

donde R_p = la velocidad de producción promedio real, unidades/h; D_a = demanda anual del producto, unidades/año; S_w = número de turnos/semana; y H_{sh} = horas/turno. Si la línea opera 52 semanas en vez de 50, $R_p = D_a/52S_wH_{sh}$. El tiempo de producción promedio correspondiente por unidad es el recíproco de R_p

$$T_p = \frac{60}{R_p} \tag{41.2}$$

donde T_p = tiempo de producción promedio real convertido a minutos.

Desafortunadamente, tal vez la línea no esté disponible para todo el tiempo dado por $50S_wH_{sh}$, debido a que los problemas de confiabilidad provocan tiempo perdido. Estos problemas incluyen fallas mecánicas y eléctricas, desgaste de las herramientas, interrupciones de corriente y desajustes del funcionamiento parecidos. De acuerdo con lo anterior, la línea debe operar a un tiempo más rápido que T_p para compensar estos problemas. Si E = eficiencia de la línea, la cual es la proporción del tiempo de funcionamiento, el tiempo de ciclo de la línea T_c está dado por

$$T_c = ET_p = \frac{60E}{R_p} \tag{41.3}$$

Cualquier producto contiene cierto contenido de trabajo que representa todas las tareas que se van a realizar en la línea. Este contenido de trabajo requiere una cantidad de tiempo, denominada el ***tiempo de contenido de trabajo*** T_{wc}. Éste es el tiempo total que se requiere para hacer el producto en la línea. Si se supone que el tiempo de contenido

del trabajo se divide de manera equitativa entre los trabajadores de manera que cada uno tenga una carga de trabajo igual, cuyo tiempo para realizarla = T_c, entonces la cantidad mínima posible de trabajadores $w_{mín}$ en la línea puede determinarse como

$$w_{mín} = \text{Entero mínimo} \geq \frac{T_{wc}}{T_c} \quad (41.4)$$

Si cada trabajador es asignado a una estación de trabajo separada, entonces el número de estaciones de trabajo es igual al número de trabajadores $n_{mín} = w_{mín}$.

Existen dos razones prácticas por las que este número de trabajadores y estaciones de trabajo usualmente no puede alcanzarse. Éstas son:

1. ***Balance imperfecto***. Es muy difícil dividir el tiempo de contenido del trabajo en forma equitativa entre todos los trabajadores. Se asignará a algunos trabajadores una cantidad de trabajo que requiera menos tiempo que T_c, y esto incrementará el número total de trabajadores requeridos.
2. ***Pérdida de tiempo en la reubicación***. Se perderá algún tiempo en cada estación debido a la reubicación del trabajo o el trabajador; por lo tanto, la cantidad de tiempo disponible en cada estación será en realidad menor que T_c, y esto también incrementará el número de trabajadores en la línea.

Estos dos temas se tratan en las siguientes secciones para el caso de líneas manuales y automatizadas.

41.2 LÍNEAS DE ENSAMBLE MANUAL

La línea de ensamble manual fue un descubrimiento importante en el crecimiento de la industria de Estados Unidos en la primera mitad del siglo XX (Nota histórica 41.1). Aun en la actualidad tiene importancia global en la manufactura de productos ensamblados, incluyendo automóviles y camiones, productos electrónicos de consumo, aparatos eléctricos, herramientas mecánicas y otros productos hechos en grandes cantidades.

Nota histórica 23.1 *Orígenes de las líneas de ensamble manual*

Las líneas de ensamble manual se basan principalmente en dos principios de trabajo fundamentales. El primero es la división del trabajo, planteada por Adam Smith en su libro *Wealth of Nations* publicado en Inglaterra en 1776. Smith no inventó la división del trabajo, puesto que se encuentran ejemplos de su uso en Europa siglos atrás, pero fue el primero en señalar su importancia en la producción. El segundo principio es el de las piezas intercambiables, basado en la obra de Eli Whitney y otros en los inicios del siglo XIX (Nota histórica 1.1). La alternativa de las piezas intercambiables, que se practicaba antes de la época de Whitney, era el limado manual de piezas individuales para lograr los ajustes.

Los antecedentes de las líneas de producción modernas pueden encontrarse en la industria de empaque de carnes en Chicago, Illinois, y Cincinnati, Ohio, donde se usaban transportadores (sin energía eléctrica) para mover reses de un trabajador al siguiente. Más tarde fueron sustituidos por transportadores eléctricos de cadena para crear las "líneas de desensamble", predecesoras de la línea de ensamble. La organización del trabajo permitía a los cortadores de carne concentrarse en tareas individuales (división del trabajo).

El industrial automotriz estadounidense, Henry Ford, observó la industria de empaque de carnes. Junto con sus colegas diseñó una línea de ensamble en 1913 en Highland Park, Michigan, para producir volantes de magneto. El resultado fue un aumento cuadruplicado en la productividad. Estimulado por este éxito, Ford aplicó técnicas de líneas de ensamble a la fabricación de chasises. Usando transportadores impulsados por cadenas y estaciones de trabajo diseñadas para conveniencia y comodidad (primeras aplicaciones de la ergonomía), se aumentó la productividad en un factor de ocho, en comparación con métodos de ensamble anteriores con una sola estación de ensamble.

El éxito de la Ford Motor Company produjo reducciones drásticas en el precio del Ford modelo T, el principal producto de la compañía en esa época. El estadounidense común pudo adquirir su automóvil propio debido a los logros de Ford en la reducción de costos. Esto obligó a sus competidores y proveedores a imitar sus métodos y la línea de ensamble manual se integró a la industria de Estados Unidos.

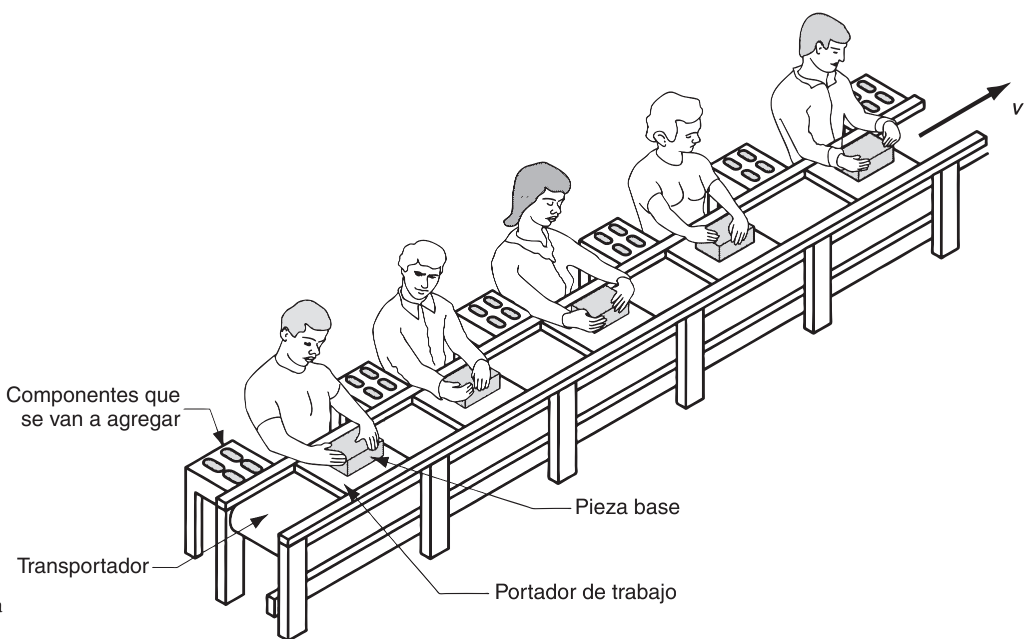


FIGURA 41.2 Parte de una línea de ensamble manual. Cada trabajador ejecuta una tarea en su estación de trabajo. Un transportador mueve las piezas en portadores de trabajo de una estación a la otra.

Una ***línea de ensamble manual*** consiste en múltiples estaciones de trabajo ordenadas en forma secuencial en las cuales trabajadores humanos ejecutan operaciones de ensamble, como en la figura 41.2. El procedimiento usual en una línea manual empieza con el "lanzamiento" de una pieza base en el extremo inicial de la línea. Con frecuencia se requiere un transportador de trabajo que contenga la pieza durante su movimiento a lo largo de la línea. La pieza base viaja por cada una de las estaciones, donde los trabajadores realizan tareas que construyen el producto en forma progresiva. En cada estación se agregan componentes a la pieza base hasta que todo el contenido de trabajo se ha terminado cuando el producto sale de la estación final. Los procesos realizados en líneas de ensamble manual incluyen operaciones de ajuste mecánico (capítulo 33), soldadura de puntos (sección 31.2), soldadura manual blanda manual (sección 32.2), y juntas adhesivas (sección 32.3).

41.2.1 Balanceo de línea y pérdidas de reubicación

Uno de los problemas técnicos más grandes en el diseño y operación de una línea de ensamble manual es el balanceo de la línea, en el cual se asignan tareas a trabajadores individuales para que todos tengan igual cantidad de trabajo. Recuerde que la totalidad del trabajo que se va a realizar en la línea se proporciona mediante el contenido del mismo. Este contenido de trabajo total se divide en ***elementos mínimos de trabajo racional***, donde cada elemento se relaciona con agregar un componente, unir los componentes o realizar alguna otra pequeña parte del contenido de trabajo total. La noción de un elemento mínimo de trabajo racional consiste en la cantidad de trabajo práctico más pequeño en la que puede dividirse el trabajo total. Los elementos de trabajos distintos requerirán tiempos diferentes, pero cuando se agrupan en tareas lógicas y se asignan a los trabajadores, los tiempos de tareas no son iguales. Por lo tanto, sencillamente por la naturaleza variable de los tiempos de elementos, algunos trabajadores tendrán más trabajo, mientras que otros tendrán menos. El tiempo de ciclo de la línea de ensamble se determina mediante la estación que tiene el tiempo de tarea más largo.

Podría pensarse que, aunque los tiempos de los elementos de trabajo son diferentes, debe ser posible encontrar grupos de elementos cuyas sumas (tiempos de tareas) sean casi iguales, o perfectamente iguales. Lo que dificulta encontrar grupos convenientes es que hay varias restricciones en este problema combinatorio. Primero, la línea debe diseñarse

para obtener cierta velocidad de producción deseada, la cual se establece antes del tiempo por ciclo T_c, en el cual debe operar la línea [ecuación (41.4)]. Por lo tanto, la suma de los tiempos de los elementos de trabajo asignados a cada estación debe ser $\leq T_c$.

Segundo, hay restricciones en el orden en que deben ejecutarse los elementos de trabajo. Algunos deben hacerse antes que otros. Por ejemplo, debe taladrarse un orificio antes de poder hacer una derivación a través de él. Un tornillo que va a usar el orificio para agregar un componente no puede ajustarse antes de que éste haya sido taladrado y roscado. Esta clase de requerimientos en la secuencia del trabajo se denominan ***restricciones de precedencia***, y hacen más complicado el problema de balancear la línea. No puede agregarse cierto elemento que se asignaría a un trabajador para obtener un tiempo de tarea $= T_c$ porque viola esta restricción de precedencia.

Éstas y otras limitaciones hacen virtualmente imposible obtener un balance de línea perfecto, lo que significa que algunos trabajadores necesitarán más tiempo para terminar sus tareas que otros. Los métodos para resolver el problema de balancear la línea, esto es, de asignar elementos de trabajo a las estaciones, se analizan en otras referencias, de hecho, existen excelentes referencias, como la [6]. La incapacidad de obtener un balanceo perfecto provoca cierto tiempo ocioso en la mayoría de las estaciones. Debido a esto, la cantidad real de trabajadores que se requieren en la línea será mayor que el número de estaciones de trabajo dado por la ecuación (41.4).

Una medida del tiempo ocioso total en una línea de ensamble manual está dada por la ***eficiencia del balanceo*** E_b, definida como el tiempo total de contenido de trabajo dividido entre el tiempo total de servicio disponible en la línea. El tiempo total de contenido de trabajo ya se ha definido, es la suma de todos los elementos de trabajo que se realizan en la línea. El tiempo total de servicio disponible en la línea puede definirse como:

$$\text{Tiempo total de servicio disponible} = wT_s$$

donde w = número de trabajadores en la línea y T_s = tiempo de servicio más largo en la línea; esto es,

$$T_s = \text{Máx}\{T_{si}\} \quad \text{para } i = 1, 2, ..., n$$

donde T_{si} = tiempo de servicio (tiempo de tarea) en la estación i, minutos. El lector puede preguntarse por qué se usó un nuevo periodo T_s, en vez del tiempo por ciclo T_c definido con anterioridad. La razón es que hay otra pérdida de tiempo en la operación de una línea de producción, además del tiempo ocioso por el balanceo imperfecto. Se llama el ***tiempo de reubicación*** T_r. Es el tiempo que se requiere en cada ciclo para que el trabajador, la unidad de trabajo o ambos se vuelvan a colocar. En una línea de transferencia continua donde se conectan unidades de trabajo a la línea y ésta se mueve a una velocidad constante, T_r es el tiempo que necesita un trabajador para caminar de la unidad que acaba de terminar a la siguiente unidad que llega a la estación. En todas las líneas de ensamble manual habrá un tiempo perdido debido a la reubicación. Se supone que T_r es igual para todos los trabajadores, aunque de hecho pueden requerirse tiempos de reubicación distintos en las diferentes estaciones. T_s, T_c y T_r pueden relacionarse del modo siguiente:

$$T_c = T_s + T_r \tag{41.5}$$

La definición de eficiencia del balanceo E_b, ahora puede escribirse en forma de ecuación de la siguiente manera:

$$E_b = \frac{T_{wc}}{wT_s} \tag{41.6}$$

Un balanceo de línea perfecto produce un valor de $E_b = 1.00$. Las eficiencias de balanceo de línea comunes en la industria varían entre 0.90 y 0.95.

La ecuación (41.6) puede reordenarse para obtener la cantidad real de trabajadores que se requieren en una línea de ensamble manual:

$$w = \text{Entero mínimo} \geq \frac{T_{wc}}{T_s E_b} \tag{41.7}$$

La utilidad de esta relación se ve afectada porque la eficiencia del balanceo E_b depende de w, según se definió en la ecuación (41.6). Desafortunadamente se tiene una ecuación donde lo que debe determinarse depende de un parámetro, que a su vez depende de lo que se está calculando. A pesar de esta desventaja, la ecuación (41.7) define la relación entre los parámetros en una línea de ensamble manual. Si se usa un valor común de E_b, basado en líneas similares anteriores, puede estimarse la cantidad de trabajadores que se requieren para producir un ensamble dado.

EJEMPLO 41.1
Línea de ensamble manual

Una línea de ensamble manual se ha planeado para un producto cuya demanda anual es de 90 000 unidades. Se usará un transportador de movimiento continuo con unidades de trabajo conectadas. El tiempo de contenido del trabajo es de 55 minutos. La línea funcionará 50 semanas/año, cinco turnos/semana y ocho horas/día. Cada trabajador será asignado a una estación de trabajo por separado. Con base en experiencias anteriores, suponga que la eficiencia de línea es = 0.95, la eficiencia de balanceo = 0.93 y el tiempo de reubicación = 9 s. Determine *a*) la velocidad de producción por hora para cumplir la demanda, *b*) el número de trabajadores y estaciones de trabajo requeridos y *c*) con propósitos de comparación, el valor mínimo ideal según está dado por $w_{mín}$ en la ecuación (41.4).

Solución: *a*) La velocidad de producción horaria requerida para satisfacer la demanda anual está dada por la ecuación (41.1):

$$R_p = \frac{90\,000}{50(5)(8)} = \textbf{45 unidades/h}$$

b) Con una eficiencia de línea de 0.95, el tiempo de ciclo ideal es

$$T_c = \frac{60(0.95)}{45} = 1.2667 \text{ min}$$

Dado el tiempo de reubicación T_r = 9 s = 0.15 min, el tiempo de servicio es

$$T_s = 1.2667 - 0.150 = 1.1167 \text{ min}$$

La cantidad de trabajadores que se requieren para operar la línea, dada por la ecuación (41.7), es igual a

$$w = \text{Entero mínimo} \geq \frac{55}{1.1167(0.93)} = 52.96 \rightarrow \textbf{53 trabajadores}$$

Suponiendo un trabajador por estación, n = **53 estaciones de trabajo**

c) Esto se compara con el mínimo ideal dado por la ecuación (41.4):

$$w_{mín} = \text{Entero mínimo} \geq \frac{55}{1.2667} = 43.42 \rightarrow \textbf{44 trabajadores y 44 estaciones de trabajo}$$

Resulta claro que el tiempo perdido debido a la reubicación y al balanceo de línea imperfecto tiene un efecto nocivo en el diseño y operación de una línea de ensamble manual. ■

41.2.2 Otros factores en el diseño de una línea de ensamble

El número de estaciones de trabajo en una línea de ensamble manual no es necesariamente igual a la cantidad de trabajadores. Para productos grandes, es posible asignar a más de un trabajador por estación. Esta práctica es común en plantas de ensamble final que construyen automóviles y camiones. Por ejemplo, dos trabajadores en una estación pueden realizar tareas de ensambles en lados opuestos del vehículo. La cantidad de trabajadores en una estación determinada se denomina ***nivel de dotación*** M_i. Si se promedian los niveles de dotación en toda la línea se tiene:

$$M = \frac{w}{n} \tag{41.8}$$

donde M = nivel de dotación promedio para la línea de ensamble; w = cantidad de trabajadores en la línea, y n = número de estaciones. Naturalmente, w y n deben ser enteros. Una dotación múltiple conserva el valioso espacio en la fábrica, debido a que reduce el número de estaciones requeridas.

Otro factor que afecta el nivel de dotación de personal en una línea de ensamble es la cantidad de ***estaciones automatizadas*** en la línea, incluyendo estaciones que emplean robots industriales (sección 39.2). La automatización reduce el personal requerido en la línea, aunque aumenta la necesidad de personal técnico capacitado para dar servicio y mantener las estaciones automatizadas. La industria automotriz utiliza de manera amplia estaciones de trabajo robóticas para ejecutar soldadura de puntos y pintura por aspersión en las carrocerías metálicas. Los robots realizan estas operaciones con gran repetibilidad, lo que se traduce en una calidad de producción más alta.

41.3 LÍNEAS DE PRODUCCIÓN AUTOMATIZADAS

Las líneas de ensamble manual utilizan normalmente un sistema de transferencia mecanizado para mover las piezas entre las estaciones de trabajo, pero las estaciones también son operadas por trabajadores. Una ***línea de producción automatizada*** consiste en estaciones de trabajo automatizadas, conectadas a un sistema de transferencia de piezas, cuya actuación está coordinada con la de las estaciones. En una situación ideal, no hay trabajadores en la línea, excepto para realizar funciones auxiliares como cambiar herramientas, cargar y descargar piezas al inicio y al final de la línea y actividades de reparación y mantenimiento. Las líneas automatizadas modernas son sistemas integrados que operan bajo el control de una computadora.

Las operaciones realizadas por estaciones automatizadas tienden a ser más simples que las que ejecutan personas en líneas manuales. La razón es que las tareas más sencillas son más fáciles de automatizar. Las operaciones que son difíciles de automatizar son las que requieren varios pasos, así como la aplicación de juicio o capacidad sensorial humana. Las tareas fáciles de automatizar consisten en elementos de trabajo únicos, movimientos de funcionamiento rápido y movimientos de alimentación en línea recta, como en el maquinado.

41.3.1 Tipos de líneas automatizadas

Las líneas de producción automatizada pueden dividirse en dos categorías básicas: 1) las que realizan operaciones de procesamiento como el maquinado, y 2) las que realizan operaciones de ensamble. Un tipo importante en la categoría de procesamiento es la línea de transferencia.

Líneas de transferencia y sistemas de procesamiento similares Una ***línea de transferencia*** es una secuencia de estaciones de trabajo que realizan operaciones de procesamiento, con una transferencia automatizada de unidades de trabajo entre las estaciones. El maquinado es la operación de procesamiento más común, como se muestra en la figura 41.3. También existen sistemas de transferencia automática para trabajar y ensamblar láminas metálicas. En el maquinado, la pieza de trabajo empieza generalmente como un fundido o forja metálicos, y se realiza una serie de operaciones de maquinado para obtener detalles de alta precisión (por ejemplo, orificios, roscas y superficies con acabado liso).

Por lo general, las líneas de transferencia son piezas de equipo costosas, que en ocasiones llegan a costar millones de dólares: se diseñan para trabajos que requieren grandes cantidades de piezas. La cantidad de maquinado que se realiza en la pieza de trabajo puede ser significativa, pero como el trabajo se divide entre muchas estaciones, las velocidades de producción son altas y los costos unitarios son bajos, en comparación con los métodos de producción alternativos. Comúnmente se usa transferencia sincrónica en las líneas de maquinado automatizadas.

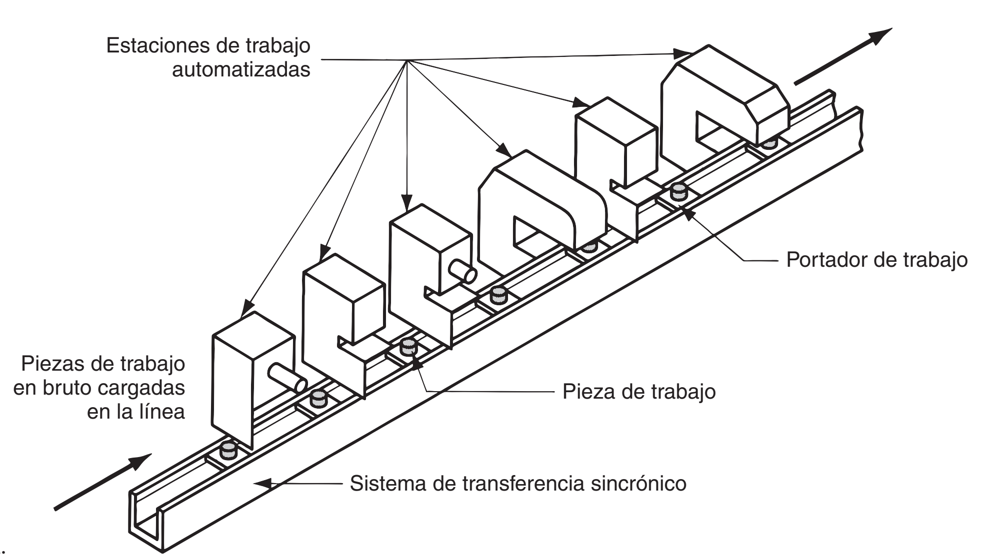


FIGURA 41.3 Línea de transferencia de maquinado, un tipo importante de línea de producción automatizada.

Una variación de la línea de transferencia automatizada es la ***máquina de carátula indizadora,*** figura 41.4, en la cual se ordenan las estaciones de trabajo alrededor de una mesa de trabajo circular, llamada carátula. En cada ciclo de trabajo se hace girar la mesa mediante un mecanismo que proporciona rotaciones parciales. El número de posiciones rotatorias está diseñado para coincidir con la cantidad de estaciones de trabajo en la periferia de la tabla. Aunque la configuración de una máquina indizadora de carátula es muy diferente a la de una línea de transferencia, su operación y su aplicación son muy similares.

Sistemas de ensamble automatizado Los ***sistemas de ensamble automatizado*** consisten en una o más estaciones de trabajo que realizan operaciones de ensamble, como agregar componentes y/o fijarlos a la unidad de trabajo. Los sistemas de ensamble automatizado se dividen en celdas de estación única y sistemas de estaciones múltiples. Las ***celdas de ensamble de estación única*** se organizan con frecuencia alrededor de un robot industrial programado para realizar una secuencia de pasos de ensamble. Un solo robot no puede trabajar tan rápido como una serie de estaciones automáticas especializadas, por lo que las celdas de estación únicas se usan para trabajos en el rango intermedio de producción.

Los ***sistemas de ensamble de estaciones múltiples*** son convenientes para producción alta. Se usan ampliamente para la producción masiva de piezas pequeñas tales como bolígrafos de punta rodante, encendedores, lámparas manuales y artículos similares con una cantidad limitada de componentes. El número de componentes y pasos de ensamble está limitado porque la confiabilidad del sistema disminuye rápidamente cuando aumenta la complejidad.

Existen sistemas de ensamble de estaciones múltiples en varias configuraciones, las cuales se muestran en la figura 41.5: *a*) en línea, *b*) rotatoria y *c*) de carrusel. La configuración en línea es la línea de transferencia convencional adaptada para realizar trabajo de

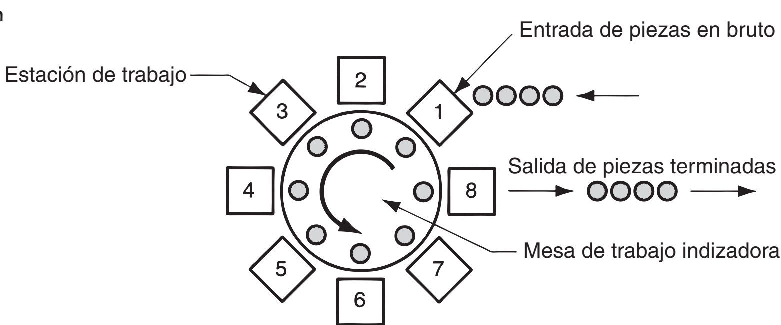


FIGURA 41.4 Configuración de una máquina de carátula indizadora.

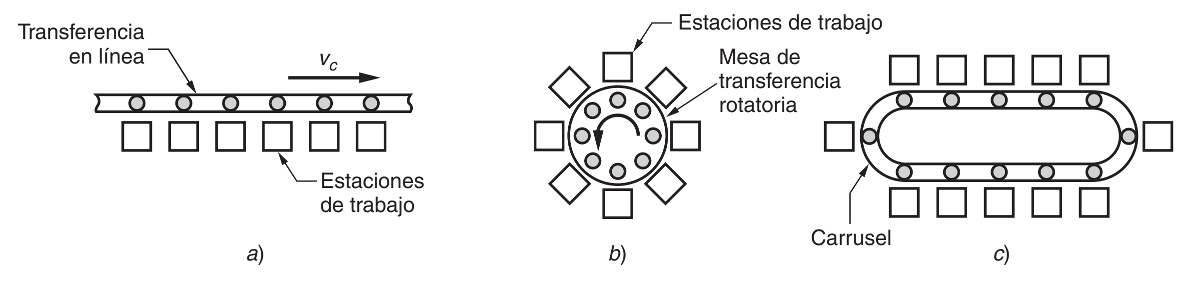


FIGURA 41.5 Tres configuraciones comunes en los sistemas de ensamble de estaciones múltiples: *a*) en línea, *b*) rotatoria y *c*) de carrusel.

ensamble. Estos sistemas no son tan masivos como sus contrapartes para maquinado. Los sistemas rotatorios se implementan usualmente como máquinas de carátula indizadora. Los sistemas de ensamble de carrusel son ordenados como un ciclo. Pueden diseñarse con una cantidad mayor de estaciones de trabajo que un sistema rotatorio. Debido a la configuración del ciclo, el carrusel permite que los portadores de trabajo regresen automáticamente al punto inicial para su reutilización, una ventaja que comparten con los sistemas rotatorios, pero no con las líneas de transferencia.

41.3.2 Análisis de las líneas de producción automatizadas

El balanceo de línea es un problema en una línea automatizada, tal como ocurre en una línea de ensamble manual. El contenido de trabajo total debe asignarse a estaciones de trabajo individuales. Sin embargo, debido a que las tareas asignadas a las estaciones automatizadas por lo general son más sencillas, y a que la línea con frecuencia contiene menos estaciones, el problema para definir qué trabajo debe hacerse en cada estación es más fácil en una línea automatizada que en una manual.

Un problema más importante en las líneas automatizadas es la confiabilidad. La línea consiste en estaciones múltiples interconectadas mediante un sistema de transferencia de trabajo. Opera como un sistema integrado y cuando un componente no funciona bien, todo el sistema se ve afectado de manera adversa. Para analizar la operación de una línea de producción automatizada, suponga un sistema que realiza operaciones de procesamiento y usa transferencias sincrónicas. Este modelo incluye líneas de transferencia, así como una máquina de carátula indizadora. No incluye sistemas de ensamble automatizados, los cuales requieren una adaptación del modelo [6]. La terminología por utilizar tomará prestados símbolos de las dos primeras secciones: n = número de estaciones de trabajo en la línea; T_c = tiempo de ciclo ideal en la línea; T_r = tiempo de reubicación, que aquí se llama el tiempo de transferencia; y T_{si} = el tiempo de servicio en la estación *i*. El tiempo de ciclo ideal T_c es el tiempo de servicio (tiempo de procesamiento) para la estación más lenta en la línea, más el tiempo de transferencia; esto es,

$$T_c = T_r + \text{Máx}(T_{si}) \tag{41.9}$$

En la operación de una línea de transferencia, los desperfectos periódicos producen pérdida de tiempo en toda la línea. Donde F = frecuencia con la que ocurren desperfectos y producen una detención de la línea, y T_d = tiempo muerto promedio por detención de la línea. Éste incluye el tiempo para que el personal entre en acción para la reparación, diagnostique la causa de la falla, la corrija y restablezca la línea.

Con base en estas definiciones, se puede formular la siguiente expresión para el tiempo de producción real promedio T_p:

$$T_p = T_c + FT_d \tag{41.10}$$

donde F = frecuencia de tiempo muerto, detenciones de línea/ciclo; y T_d = tiempo muerto en minutos por detención de línea. Así, FT_d = tiempo muerto promedio por cada ciclo. La

velocidad de producción real promedio es el recíproco de T_p

$$R_p = \frac{60}{T_p}$$

como se estableció previamente en la ecuación (41.2). Resulta interesante comparar esta velocidad con la velocidad de producción ideal, dada por

$$R_c = \frac{60}{T_c} \tag{41.11}$$

donde R_p y R_c se expresan en piezas por hora, dado que T_p y T_c se expresan en minutos.

Con base en esta relación, puede definirse la eficiencia de línea E para una línea de transferencia. En el contexto de los sistemas de producción automatizada, E se refiere a la proporción de tiempo de funcionamiento de la línea y en realidad es una medida de confiabilidad más que de eficiencia:

$$E = \frac{T_c}{T_c + FT_d} \tag{41.12}$$

Ésta es la misma relación que la ecuación (41.3) anterior, dado que $T_p = T_c + FT_d$. Debe señalarse que se aplica la misma definición de eficiencia de línea a las líneas de ensamble manual, excepto que los desperfectos tecnológicos no son un problema en las líneas manuales (los trabajadores son más confiables que el equipo electromecánico, al menos en el sentido que se analiza aquí).

Por lo general, el tiempo muerto de línea se asocia con fallas en las estaciones individuales. Entre las razones por las que ocurre el tiempo muerto están los cambios de herramientas programados y no programados, las averías mecánicas y eléctricas, las fallas hidráulicas y el desgaste normal del equipo. Suponga que p_i = probabilidad o frecuencia de una falla en la estación i, entonces

$$F = \sum_{i=1}^{n} p_i \tag{41.13}$$

Si se supone que todos los p_i son iguales o se calcula un valor promedio de p_i llamándolo en ambos casos p, entonces:

$$F = np \tag{41.14}$$

Estas dos ecuaciones indican claramente que la frecuencia de detenciones de línea aumenta con la cantidad de estaciones en la línea. Establecido de otra manera, la confiabilidad en la línea disminuye conforme se agregan estaciones.

EJEMPLO 41.2 Línea de transferencia automatizada

Una línea de transferencia automatizada tiene 20 estaciones y un tiempo por ciclo ideal de 1.0 minutos. La probabilidad de falla en una estación es $p = 0.01$ y el tiempo muerto promedio cuando ocurre un desperfecto es de 10 minutos. Determine *a*) la velocidad promedio de producción R_p y *b*) la eficiencia de línea E.

Solución: La frecuencia de desperfectos en la línea está dada por $F = pn = 0.01 \times 20 = 0.20$. Por lo tanto, el tiempo de producción promedio real es

$$T_p = 1.0 + 0.20(10) = 3.0 \text{ minutos}$$

a) Entonces, la velocidad de producción es

$$R_p = \frac{60}{T_p} = \frac{60}{3.0} = 20 \text{ piezas/hora}$$

Observe que es mucho menor que la velocidad de producción ideal:

$$R_c = \frac{60}{T_c} = \frac{60}{1.0} = 60 \text{ piezas/hora}$$

b) La eficiencia de línea se calcula como

$$E = \frac{T_c}{T_p} = \frac{1.0}{3.0} = 0.333 \text{ (o 33.3\%)}$$

En este ejemplo se observa que si una línea de producción opera de esta forma, pasa más tiempo detenida que activa. Obtener altas eficiencias es un problema real en las líneas de producción automatizada.

El costo de operación en una línea de producción automatizada es el costo de inversión del equipo e instalación, más el costo de mantenimiento, de los repuestos y del personal asignado a la línea. Estos costos se convierten a un costo anual uniforme equivalente y se dividen entre el número de horas de operación por año para obtener una razón por hora. Esta razón de costo por hora puede usarse para calcular el costo unitario al procesar una pieza de trabajo en la línea

$$C_p = \frac{C_o T_p}{60} \tag{41.15}$$

donde C_p = costo de procesamiento unitario, \$/pieza; C_o = razón por hora al operar la línea, como se describió anteriormente, \$/hora; T_p = tiempo de producción promedio real por pieza de trabajo, min/pieza; y la constante 60 convierte la razón de costo por hora a \$/min para tener consistencia en las unidades.

REFERENCIAS

[1] Boothroyd, G., Poli, C. y Murch, L. E. ***Automatic Assembly.*** Marcel Dekker, Nueva York, 1982.

[2] Buzacott, J. A. "Prediction of the Efficiency of Production Systems without Internal Storage." ***International Journal of Production Research***, vol. 6, núm. 3, 1968, pp. 173-188.

[3] Buzacott, J. A. y Shanthikumar, J. G. ***Stochastic Models of Manufacturing Systems***. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1993.

[4] Chow, W-M. ***Assembly Line Design***. Marcel Dekker, Nueva York, 1990.

[5] Groover, M. P. "Analyzing Automatic Transfer Lines." ***Industrial Engineering,*** vol. 7, núm. 11, 1975, pp. 26-31.

[6] Groover, M. P. ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing,*** 2a. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

[7] Riley, F. J. ***Assembly Automation, A Management Handbook,*** 2da. ed. Industrial Press, Nueva York, 1999.

[8] Wild. R. ***Mass-Production Management.*** John Wiley & Sons, Londres, 1972.

PREGUNTAS DE REPASO

41.1. ¿Qué es una línea de producción?

41.2. ¿Cuál es la diferencia entre una línea de producción de modelo por lotes y una línea de producción de modelo mixto?

41.3. ¿Cuáles son las ventajas del modelo mixto sobre el modelo por lotes para producir diferentes estilos de productos?

41.4. ¿Cuáles son algunas de las limitaciones en una línea de modelo mixto, comparada con un línea de modelo por lotes?

41.5. Describa cómo se usan los métodos manuales para mover piezas entre las estaciones de trabajo en una línea de producción.

41.6. Defina brevemente los tres tipos de sistemas mecanizados de transferencias de piezas de trabajo que se usan en las líneas de producción.

41.7. ¿Por qué algunas veces se fijan al portador las piezas en un sistema de transferencia continua en el ensamble manual?

41.8. ¿Por qué debe establecerse una línea de producción a una velocidad más alta que la requerida para cubrir la demanda del producto?

41.9. ¿Por qué no es posible determinar el número de trabajadores simplemente a partir de la razón T_{wc}/T_c?

41.10. ¿Por qué el problema del balanceo en una línea de transferencia automatizada no es tan difícil como en una línea de ensamble manual?

41.11. El tiempo de reubicación en una línea de transferencia sincrónica se conoce por un nombre diferente, ¿cuál es ese nombre?

41.12. ¿Por qué generalmente no son convenientes las celdas de ensamble de estación única para trabajos de alta producción?

41.13. ¿Cuáles son algunas de las razones que provocan el tiempo muerto en una línea de transferencia de maquinado?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 10 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

41.1. ¿Para cuál de las siguientes situaciones de producción son más convenientes las líneas de modelos por lotes? *a*) taller de trabajo, *b*) producción masiva o *c*) producción intermedia.

41.2. ¿A cuál de los siguientes métodos de transferencia mecanizada es probable que estén más cercanos los métodos manuales de transferencia de piezas de trabajo? *a*) asincrónicos, *b*) continuos o *c*) sincrónicos.

41.3. ¿Mediante cuál de las siguientes opciones se describen mejor las restricciones de precedencia?: *a*) secuencia de lanzamiento en una línea de modelo mixto, *b*) valor límite en la suma de tiempos de elemento que puede asignarse a un trabajador o estación, *c*) orden de las estaciones de trabajo a lo largo de la línea o *d*) secuencia en la cual deben hacerse los elementos de trabajo.

41.4. ¿Cuál de las siguientes frases es más apropiada para describir las características de las tareas que se realizan en las estaciones de trabajo automatizadas? (tres mejores respuestas): *a*) complejas, *b*) consisten en elementos de trabajo múltiples, *c*) implican un elemento de trabajo único, *d*) implican movimientos en línea recta, *e*) requiere capacidad sensorial y *f*) simple.

41.5. ¿Con cuál de los siguientes tipos de operaciones de producción se asocia más estrechamente la línea de transferencia?: *a*) ensamble, *b*) fabricación de chasises automotrices, *c*) maquinado, *d*) trabajo en prensa, o *e*) soldadura de puntos.

41.6. ¿Cuál de los siguientes tipos de transferencia de piezas de trabajo usa una máquina de carátula indizadora?: *a*) asincrónico, *b*) continuo, *c*) piezas pasadas a mano o *d*) sincrónico.

41.7. ¿Cuál de los siguientes enfoques puede aumentar la eficiencia de línea (la proporción de tiempo en funcionamiento) en una línea automatizada? (dos respuestas correctas): *a*) mejorar la confiabilidad de cada estación de trabajo en la línea, *b*) aumentar el número de estaciones en la línea, *c*) reducir el tiempo de ciclo T_c, y *d*) reducción del tiempo muerto promedio T_d.

PROBLEMAS

Líneas de ensamble manual

41.1. Se pretende diseñar una línea de ensamble manual para un producto con una demanda anual de 100 000 unidades. La línea funcionará 50 semanas/año, 5 turnos/semana y 7.5 hora/turno. Las unidades de trabajo se conectarán a un transportador de movimiento continuo. El tiempo de contenido de trabajo es de 42.0 min. Suponga una eficiencia de línea de 0.97, una eficiencia de balanceo de 0.92 y un tiempo de reubicación de 6 s. Determine *a*) la velocidad de producción por hora para cumplir la demanda, *b*) el número de trabajadores requeridos y *c*) el número de estaciones de trabajo requeridas, si el nivel de dotación es de 1.4.

41.2. Una línea de ensamble manual produce un pequeño aparato eléctrico cuyo tiempo de contenido de trabajo es de 25.9 min. La velocidad de producción deseada es de 50 unidades/hora. El tiempo de reubicación es de 6 s, la eficiencia de línea de 95%, y la eficiencia de balanceo es 93%. ¿Cuántos trabajadores hay en la línea?

41.3. Una línea de ensamble manual de modelo único produce un artículo cuyo tiempo de contenido de trabajo es de 47.8 min. La línea tiene 24 estaciones de trabajo con un nivel de dotación de 1.25. El tiempo por turno disponible al día es de 8 horas, pero el tiempo muerto durante el cambio reduce el tiempo de producción real a 7.6 horas en promedio. Esto da por resultado una producción diaria promedio de 256 unidades/día. El tiempo de reubicación por trabajador es de 8% del tiempo de ciclo. Determine *a*) la eficiencia de línea, *b*) la eficiencia de balanceo y *c*) el tiempo de reubicación.

41.4. Una planta de ensamble final para cierto modelo de automóvil va a tener una capacidad de 240 000 unidades al año. La planta operará 50 semanas/año, 2 turnos/día, 5 días/semana y 8.0 horas/turno. Se dividirá en tres departamentos: 1) sección de carrocería, 2) sección de pintura y 3) departamento de acondicionamiento final del chasis. La sección de carrocería suelda los chasises usando robots y la sección de pintura recubre las carrocerías. Estos dos departamentos están altamente automatizados. El de acondicionamiento de chasis no está automatizado. En este departamento hay 15.5 horas de contenido de mano de obra directa en cada automóvil, donde los vehículos se mueven mediante un transportador continuo. Determine *a*) la velocidad de producción por hora de la planta, y *b*) el número de trabajadores y estaciones de trabajo requeridos en el acabado final de chasis si no se usan estaciones automatizadas. El nivel de dotación de mano de obra promedio es de 2.5, la eficiencia del balanceo es de 93%, la proporción de tiempo de funcionamiento de 95% y se permite un tiempo de reubicación de 0.15 min para cada trabajador.

41.5. Se va a ensamblar un producto cuyo tiempo total de contenido de trabajo es de 50 min en un línea de producción manual. La velocidad de producción requerida es de 30 unidades/hora. De experiencias anteriores con productos similares, se estima que el nivel de dotación de personal se acercará a 1.5. Suponga que la proporción de tiempo en funcionamiento y la eficiencia del balanceo de la línea son ambas de 1.0. Si

se perdieran 9 s del tiempo de ciclo para reubicación, determine *a*) el tiempo de ciclo, ¿*b*) cuántos trabajadores y *c*) estaciones se necesitarán en la línea?

41.6. Una línea de ensamble manual tiene 17 estaciones de trabajo con un operador por estación. El tiempo de contenido de trabajo para ensamblar el producto es de 22.2 min. La velocidad de producción de la línea es de 36 unidades/hora. Se usa un sistema de transferencia sincrónica para avanzar los productos de una estación a la siguiente y el tiempo de transferencia es de 6 s. Los trabajadores permanecen sentados a lo largo de la línea. La proporción de tiempo en funcionamiento es de 0.90. Determine la eficiencia del balanceo.

41.7. Una línea de producción con cuatro estaciones de trabajo automatizadas (las otras son manuales) produce cierto artículo cuyo tiempo de contenido de trabajo del ensamble total es de 55.0 min de mano de obra manual directa. La velocidad de producción requerida es de 45 unidades por hora. Debido a las estaciones automatizadas, la línea tiene una eficiencia de tiempo de funcionamiento de 89%. Cada una de las estaciones manuales tiene un trabajador. Se sabe que se pierde el 10% del tiempo de ciclo debido a la reubicación. Si la eficiencia de balanceo es de 0.92 en las estaciones manuales, encuentre *a*) el tiempo de ciclo, *b*) el número de trabajadores y *c*) las estaciones de trabajo en la línea; *d*) ¿Cuál es el nivel de dotación de personal promedio en la línea, donde el promedio incluye las estaciones automáticas?

41.8. La velocidad de producción para cierto producto ensamblado es de 47.5 unidades/hora. El tiempo total de contenido de trabajo de ensamble es de 32 min de mano de obra manual directa. La línea opera al 95% de tiempo de funcionamiento. Diez estaciones de trabajo tienen dos trabajadores en lados opuestos de la línea, de modo que se trabajan ambos lados del producto en forma simultánea. Las estaciones restantes tienen un trabajador. El tiempo de reubicación que pierde cada trabajador es de 0.2 min/ciclo. Se sabe que el número de trabajadores en la línea es dos más que el número requerido para un balanceo perfecto. Determine *a*) el número de trabajadores, *b*) el número de estaciones de trabajo, *c*) la eficiencia del balanceo y *d*) el nivel de asignación de personal promedio.

41.9. El contenido de trabajo total para un producto ensamblado en una línea de producción manual es de 48 min. El movimiento del trabajo se consigue usando un transportador continuo que opera a una velocidad de 3 ft/min. Hay 24 estaciones de trabajo en la línea, un tercio de las cuales tienen dos trabajadores; cada una de las estaciones restantes tiene un trabajador. El tiempo de reubicación por trabajador es de 9 s y la eficiencia de tiempo en funcionamiento de la línea es de 95%. *a*) ¿Cuál es la máxima velocidad de producción por hora posible si se supone que la línea está perfectamente equilibrada? *b*) Si la velocidad de producción real es de sólo 92% de la velocidad máxima posible determinada en el inciso *a*), ¿cuál es la eficiencia del balanceo de la línea?

Líneas de producción automatizadas

41.10. Una línea de transferencia automatizada tiene 20 estaciones y opera con un tiempo de ciclo ideal de 1.50 min. La probabilidad de falla por estación es de 0.008 y el tiempo muerto promedio cuando ocurre un desperfecto es de 10.0 min. Determine *a*) la velocidad de producción promedio y *b*) la eficiencia de línea.

41.11. Una mesa de carátula indizadora tiene seis estaciones. Se usa una estación para cargar y descargar, lo cual es realizado por un trabajador. Las otras cinco ejecutan operaciones de procesamiento. El proceso más largo requiere 25 s y el tiempo de indización es de 5 s. Cada estación tiene una frecuencia de falla de 0.015. Cuando ocurre una falla, se requiere un promedio de 3.0 min para hacer reparaciones y reiniciar. Determine *a*) la velocidad de producción por hora y *b*) la eficiencia de la línea.

41.12. Se ha observado una línea de transferencia de siete estaciones durante un periodo de 40 horas. Los tiempos de procesamiento en cada estación son los siguientes: Estación 1, 0.80 min; estación 2, 1.10 min; estación 3, 1.15 min; estación 4, 0.95 min; estación 5, 1.06 min; estación 6, 0.92 min y estación 7, 0.80 min. El tiempo de transferencia entre estaciones es de 6 s. El número de ocurrencias de detenciones es de 110, y las horas de tiempo muerto de 14.5. Determine *a*) el número de piezas producidas durante la semana, *b*) la velocidad de producción real promedio en piezas/hora y *c*) la eficiencia de línea; *d*) Si se calculara la eficiencia del balanceo para esta línea, ¿cuál sería su valor?

41.13. Una línea de transferencia de 12 estaciones se diseñó para operar con una velocidad de producción ideal de 50 piezas/hora. Sin embargo, la línea no consigue esta velocidad, puesto que la eficiencia de línea es de 0.60. Operar la línea cuesta 75 dólares/hora, exclusivamente por materiales. La línea opera 4 000 h/año. Se ha propuesto un sistema de monitoreo por computadora que costará 25 000 dólares (instalado), y reducirá el tiempo muerto en la línea en un 25%. Si el valor agregado por unidad producida es de 4.00 dólares, ¿se pagará el sistema de computadora en el primer año de operación? Use el incremento esperado en los ingresos producidos por el sistema de computadoras como el criterio. En sus cálculos, no tome en cuenta los costos de materiales.

41.14. Se va a diseñar una línea de transferencia automatizada. Con base en experiencias anteriores, el tiempo muerto promedio por ocurrencia es de 5.0 min y la probabilidad de una falla en estación que produzca la ocurrencia de tiempo muerto p es de 0.01. El tiempo total de contenido de trabajo es de 9.8 min y se va a dividir entre las estaciones de trabajo, por lo que el tiempo de ciclo ideal para cada estación es de $9.8/n$. Determine *a*) el número óptimo n de estaciones en la línea que maximice la velocidad de producción y *b*) la velocidad de producción y la proporción de tiempo en funcionamiento para su respuesta al inciso *a*).

Parte XI
Sistemas de apoyo a la manufactura

42 INGENIERÍA DE MANUFACTURA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En esta parte final del libro se tratan los ***sistemas de apoyo a la manufactura***, que constituyen el conjunto de procedimientos y sistemas utilizados por una compañía para resolver los problemas técnicos y logísticos que se encuentran en el proceso de planeación, los pedidos de material, el control de la producción y el aseguramiento de que los productos de la compañía satisfagan las especificaciones de calidad requeridos. La posición de los sistemas de apoyo a la manufactura en las operaciones globales de la compañía se ilustra en la figura 42.1. Al igual que en los sistemas de manufactura en la fábrica, los sistemas de apoyo a la manufactura incluyen personas. Éstas hacen que los sistemas funcionen. A diferencia de los sistemas de manufactura en la fábrica, la mayoría de los sistemas de apoyo no tienen contacto directo con el producto durante su procesamiento y ensamble. En vez de esto, planean y controlan las actividades en la fábrica para asegurar que los productos se terminen y se entreguen al cliente a tiempo, en las cantidades correctas y con los estándares de calidad más altos.

El sistema de control de calidad es uno de los sistemas de apoyo a la manufactura, pero también consiste en instalaciones que se localizan en la fábrica, equipo de inspección usado para medir y calibrar los materiales en proceso y los productos que se están ensamblando. El sistema de control de calidad se cubre en dos capítulos: el capítulo 44 sobre control de calidad y el 45 sobre medición e inspección. Otros sistemas de apoyo a la manufactura que se estudian en esta parte del libro son la planeación y el control de la producción, en el capítulo 43, y la ingeniería de manufactura, que se cubre en este capítulo.

La ***ingeniería de manufactura*** es una función que realiza el personal técnico, y está relacionada con la planeación de los procesos de manufactura para la producción económica de productos de alta calidad. Su papel principal consiste en preparar la transición del producto desde las especificaciones de diseño hasta la manufactura de un producto físico.

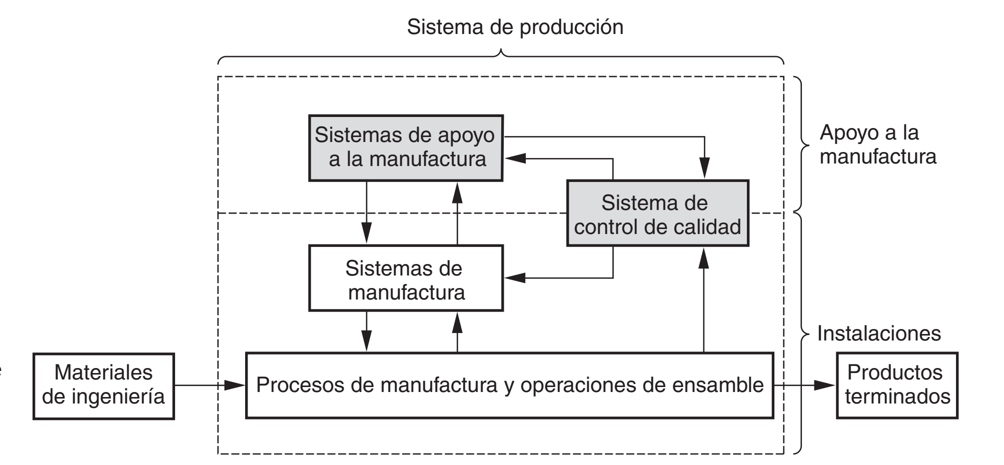


FIGURA 42.1 Posición de los sistemas de apoyo a la manufactura en el sistema de producción.

Su propósito general es optimizar la manufactura dentro de una organización particular. El ámbito de la ingeniería de manufactura incluye muchas actividades y responsabilidades que dependen del tipo de operaciones de producción que realiza la organización particular. Entre las actividades usuales están las siguientes:

- ***Planeación de procesos***. Como lo sugiere la definición, ésta es la principal actividad de la ingeniería de manufactura. La planeación de procesos incluye: *a*) decidir qué procesos y métodos deben usarse y en qué secuencia, *b*) determinar los requerimientos de habilitación de herramientas, *c*) seleccionar el equipo y los sistemas de producción y *d*) estimar los costos de producción para los procesos, la habilitación de herramientas y los equipos seleccionados.
- ***Solución de problemas y mejora continua***. La ingeniería de manufactura proporciona personal de apoyo a los departamentos operativos (fabricación de piezas y ensamble de productos) para resolver problemas técnicos de producción. También debe poner en práctica esfuerzos continuos para reducir los costos de producción, aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos.
- ***Diseño para la manufacturabilidad***. En esta función, que cronológicamente se encuentra antes que las otras dos, los ingenieros en manufactura sirven como consejeros de manufacturabilidad para los diseñadores del producto. El objetivo es crear diseños que no sólo cumplan requerimientos funcionales y de rendimiento, sino que también puedan producirse a costos razonables, con un mínimo de problemas técnicos, con la mayor calidad y en el menor tiempo posible.

La ingeniería de manufactura debe realizarse en cualquier organización industrial relacionada con la producción. El departamento de ingeniería de manufactura por lo genera] depende del gerente de manufactura en una organización. En algunas compañías el departamento se conoce con otros nombres, como ingeniería de procesos o ingeniería de producción. Con frecuencia, bajo la ingeniería de manufactura, se incluyen el diseño de herramientas, la fabricación de herramientas y diversos grupos de apoyo técnico.

42.1 PLANEACIÓN DE PROCESOS

La ***planeación de procesos*** implica determinar los procesos de manufactura más adecuados y el orden en el cual deben realizarse para producir una pieza o producto determinados, que se especifican en la ingeniería de diseño. Si es un producto ensamblado, la planeación de procesos debe definir la secuencia apropiada de los pasos de ensamble. El plan de proceso debe ejecutarse dentro de las limitaciones impuestas por el equipo de procesamiento disponible y la capacidad productiva de la fábrica. Las piezas o subensambles que no pueden hacerse en forma interna deben comprarse a proveedores externos. En algunos casos,

los artículos que pueden producirse en forma interna se deben adquirir con vendedores externos por razones económicas o de otro tipo.

42.1.1 Planeación tradicional de procesos

Tradicionalmente, la planeación de procesos es realizada por ingenieros en manufactura que conocen los procesos particulares que se usan en la fábrica y son capaces de leer dibujos de ingeniería. Con base en su conocimiento, capacidad y experiencia, llevan a cabo los pasos de procesamiento que se requieren en la secuencia más lógica para hacer cada pieza. En la tabla 42.1 se enlistan varios detalles y decisiones que por lo general se incluyen dentro del ámbito de la planeación de procesos. Con frecuencia, algunos de estos detalles se delegan a especialistas, como diseñadores de herramientas; pero la responsable por dichos detalles es la ingeniería de manufactura.

Planeación de procesos para piezas Los procesos necesarios para manufacturar una pieza específica se determinan en gran parte por el material con que se fabrica la pieza. El diseñador del producto selecciona el material con base en los requerimientos funcionales. Una vez seleccionado el material, la elección de los procesos posibles se delimita considerablemente. En el análisis de los materiales para ingeniería se proporcionan guías para el procesamiento de cuatro grupos de materiales: metales (sección 6.5), cerámicos (sección 7.6), polímeros (sección 8.5) y materiales compuestos (sección 9.5).

Una secuencia típica de procesamiento para fabricar una pieza separada consiste en: 1) un proceso básico, 2) uno o más procesos secundarios, 3) operaciones para mejorar las propiedades físicas y 4) operaciones de terminado, esta secuencia se ilustra en la figura 42.2. Los procesos básicos y secundarios son de formado (sección 1.3.1) que alteran la forma de la pieza de trabajo. Un ***proceso básico*** establece la configuración geométrica inicial de la pieza. Entre ellos están la fundición de metales, el forjado y el laminado de hojas metálicas. En la mayoría de los casos, la geometría inicial debe refinarse mediante una serie de ***procesos secundarios***. Estas operaciones transforman la forma básica en la configuración geométrica final. Hay una correlación entre los procesos secundarios que podrían usarse y

TABLA 42.1 Detalles y decisiones requeridos en la planeación de procesos.

Procesos y secuencias. El plan del proceso debe describir brevemente todos los pasos de procesamiento que se usan en la unidad de trabajo (por ejemplo, ensamble de piezas), así como el orden en el cual se realizan.

Selección del equipo. En general, la ingeniería de manufactura pretende implantar planes de procesos que utilicen equipo existente. Cuando esto no es posible, debe comprarse el componente en cuestión (sección 42.1.2) o debe instalarse equipo nuevo en la planta.

Herramientas, dados, moldes, soportes y ***calibradores.*** El planificador del proceso debe decidir qué herramientas necesita cada proceso. El diseño de estos artículos por lo general se delega al departamento de diseño de herramientas y la fabricación se realiza en un taller de herramientas.

Herramientas de corte y ***condiciones de corte*** para las operaciones de maquinado. Éstas las especifica el planificador de procesos, el ingeniero industrial, el encargado de taller o el operador de máquinas, con frecuencia de acuerdo con las recomendaciones de un manual estándar.

Métodos. Los métodos incluyen movimientos de la mano y el cuerpo, distribución del lugar de trabajo, herramientas pequeñas, grúas para levantar piezas pesadas. Deben especificarse métodos para operaciones manuales (por ejemplo, ensamble) y las partes manuales de los ciclos de maquinado (como cargar y descargar una máquina para la producción). La planeación de métodos ha sido tradicionalmente el ámbito de los ingenieros industriales. El énfasis actual en los equipos de trabajo autodirigidos y la adquisición de poder de los trabajadores hicieron que gran parte de las responsabilidades del análisis de métodos de los ingenieros industriales pasaran a los trabajadores que deben realizar las tareas.

Estándares de trabajo. Se aplican técnicas de medición del trabajo para establecer estándares de tiempo para cada operación.

Estimación de los costos de producción. Con frecuencia lo realizan estimadores de costos con ayuda del planificador de procesos.

Manejo de materiales. Debe considerarse el problema de mover materiales y el trabajo en proceso dentro de la fábrica.

Distribución de la planta y ***diseño de instalaciones.*** Por lo general, esto es responsabilidad del departamento de ingeniería de la planta que trabaja con la ingeniería de manufactura.

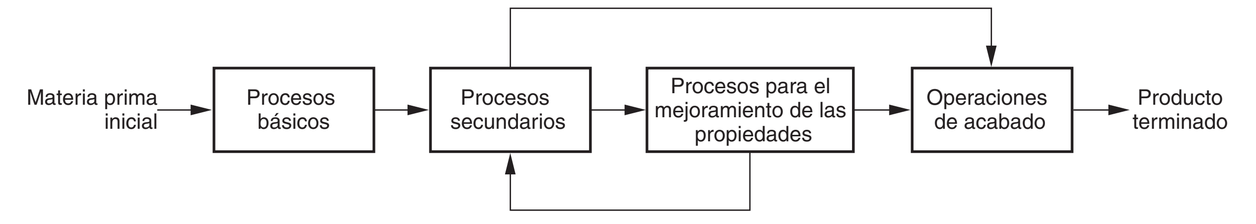


FIGURA 42.2 Secuencia típica de procesos requeridos en la fabricación de piezas.

el proceso básico que proporciona la forma inicial. Por ejemplo, cuando el proceso básico es el fundido en arena o el forjado, generalmente los procesos secundarios son operaciones de maquinado. Cuando una laminadora produce tiras o rollos de lámina metálica, los procesos secundarios son operaciones de estampado, como el suajado, el perforado y el doblado. La selección de ciertos procesos básicos reduce la necesidad de procesos secundarios. Por ejemplo, si el proceso básico es el moldeado por inyección de plásticos, por lo general no se requieren operaciones secundarias, dado que con el moldeo se obtienen características geométricas detalladas con buena precisión en las dimensiones.

Después de las operaciones de formado, por lo general se realizan otras para mejorar las propiedades físicas y/o terminar el producto. Las ***operaciones para mejorar las propiedades*** incluyen el tratamiento térmico en componentes metálicos y cristalería. En muchos casos, las piezas no requieren estos pasos en su secuencia de procesamiento. Esto se indica por medio de la trayectoria de la flecha alternativa en la figura. Las ***operaciones de acabado*** son las últimas de la secuencia: por lo general proporcionan un recubrimiento en la superficie de la parte de trabajo (o ensambles). Entre estos procesos están la galvanoplastia y la pintura.

En algunos casos, después de los procesos de mejoramiento de propiedades se aplican operaciones secundarias adicionales antes de proceder al acabado, como lo sugiere el ciclo de retorno de la figura 42.2. Un ejemplo es una pieza maquinada que se endurece mediante tratamiento térmico. Antes de éste, la pieza se deja con un tamaño más grande de lo ideal para permitir la distorsión. Después del endurecimiento, se reducen al tamaño y tolerancia finales mediante acabado por esmerilado. Otro ejemplo, de nuevo en la fabricación de piezas metálicas, es cuando se usa el recocido para restablecer la ductilidad del metal después del trabajo en frío, para permitir una deformación posterior de la pieza de trabajo.

En la tabla 42.2 se presentan algunas de las secuencias de procesamiento típicas para una variedad de materiales y procesos básicos.

Por lo general, la tarea del planificador de procesos empieza después de que el proceso básico ha producido la forma inicial de la pieza. Las piezas maquinadas empiezan como

TABLA 42.2 Algunas secuencias de procesamiento típicas.

Proceso básico	Proceso(s) secundario(s)	Proceso de mejoramiento de las propiedades	Operaciones de acabado
Fundición en arena	Maquinado	(ninguno)	Pintado
Fundido en troquel	(ninguno, forma neta)	(ninguno)	Pintado
Fundición de vidrio	Presión, moldeado soplado	(ninguno)	(ninguna)
Moldeado por inyección	(ninguno, forma neta)	(ninguno)	(ninguna)
Laminado de barra	Maquinado	Tratamiento térmico (opcional)	Electrochapeado
Laminado de hoja metálica	Suajado, doblado, grabado	(ninguno)	Electrochapeado
Forjado	Maquinado (casi la forma neta)	(ninguno)	Pintado
Extrusión de aluminio	Corte a longitud	(ninguno)	Anodizado
Atomización de polvos metálicos	Presión de la pieza PM	Sinterizado	Pintado

Recopilado de [5].

TABLA 42.3 Directrices y consideraciones para decidir los procesos y su secuencia en la planeación del proceso.

Requerimientos de diseño. La secuencia de procesos debe satisfacer las dimensiones, tolerancias, acabados de superficies y otras especificaciones establecidas por el diseño de productos.

Requerimientos de calidad. Deben seleccionarse procesos que satisfagan los requerimientos de calidad en términos de tolerancias, integridad de las superficies, consistencia y capacidad de repetición, y otras medidas de calidad.

Volumen y ***velocidad de producción.*** El proceso debe ser capaz de cumplir el volumen y la velocidad requerida de producción. ¿Se encuentra el producto en la categoría de producción baja, mediana o alta? El volumen y la velocidad de producción influyen de gran manera en los procesos y los sistemas de manufactura.

Procesos disponibles. Si el producto y sus componentes se van a hacer en forma interna, el planificador debe seleccionar, en lo posible, los procesos y el equipo disponible en la fábrica.

Utilización del material. Es conveniente que la secuencia de procesos use en forma eficiente los materiales y reduzca el desperdicio. Cuando sea posible, deben seleccionarse procesos de ***formas netas*** *o* ***casi netas***, (sección 1.3.1).

Restricciones de precedencia. Son requerimientos de secuencia tecnológica que determinan o restringen el orden en el cual se realizan los pasos del procesamiento. Ejemplos: debe taladrarse un orificio antes de que pueda roscarse; una pieza de metal pulverizado debe prensarse antes de sinterizarse; una superficie debe limpiarse antes de pintarse; y así sucesivamente.

Superficies de referencia. Ciertas superficies de la pieza deben formarse (generalmente mediante maquinado) casi al principio de la secuencia a fin de que funcionen como superficies de ubicación para otras dimensiones que se formarán después. Por ejemplo, si se va a taladrar un orificio a cierta distancia del borde de una pieza determinada, primero debe maquinarse ese borde.

Minimizar la preparación. Debe minimizarse la cantidad de preparaciones separadas de máquinas. Cuando sea posible, las operaciones deben combinarse en la misma estación de trabajo. Esto ahorra tiempo y reduce el manejo de materiales. Esta directriz se aplica principalmente a operaciones secundarias, como el maquinado.

Eliminar pasos innecesarios. La secuencia de procesos debe planearse con la cantidad mínima de pasos de procesamiento. Deben evitarse las operaciones innecesarias y pedirse cambios en el diseño para eliminar características que no son absolutamente necesarias, y por ende suprimir los pasos de procesamiento asociados con dichas características.

Flexibilidad. Cuando sea posible, el proceso debe ser suficientemente flexible para adoptar cambios en el diseño de ingeniería. Con frecuencia esto es un problema cuando deben diseñarse herramientas especiales para producir la pieza; si se cambia el diseño de la pieza, la herramienta especial puede resultar obsoleta.

Seguridad. La seguridad de los trabajadores debe considerarse en la selección de un proceso. Esto tiene un buen sentido económico y es una ley (Occupational Safety and Health Act).

Costo mínimo. La secuencia de procesos debe ser el método de producción que satisfaga todos los requerimientos anteriores y también obtenga el costo de producto más bajo posible.

materia prima en barras, fundiciones o forjados, y con frecuencia los procesos básicos para estas formas iniciales son externos a la planta de fabricación. El estampado empieza como rollos o tiras de chapas metálicas adquiridos de otra fábrica. Éstas son las materias primas que proporcionan proveedores externos para los procesos secundarios y las operaciones posteriores que se realizarán en la fábrica. Los procesos más apropiados y el orden en el cual deben realizarse, se determinan con base en la capacidad, experiencia y juicio del planificador de procesos. En la tabla 42.3 se esquematizan algunas de las directrices y consideraciones que usan los planificadores de procesos para tomar estas decisiones.

La hoja de ruta El plan de proceso se prepara en un formato denominado ***hoja de ruta***, de la que aparece un ejemplo en la figura 42.3 (algunas compañías usan otros nombres para esta forma). La hoja de ruta se llama así porque especifica la secuencia de operaciones y el equipo que visitará la pieza durante su producción. La hoja de ruta es al planificador de procesos lo que el dibujo de ingeniería es al diseñador del producto. Es un documento oficial que especifica los detalles del plan de procesos. La hoja de ruta debe incluir todas las operaciones de manufactura que se van a realizar en la pieza de trabajo, enlistadas en el orden conveniente en el que se van a realizar. Para cada operación, debe enlistarse lo siguiente: 1) una breve descripción de la operación, indicando el trabajo que se va a realizar, las superficies que se van a procesar ya indicadas en dibujo de la pieza y las dimensiones (y las tolerancias, si no están especificadas en el dibujo de la pieza) que se van a obtener; 2) el equipo en el cual se va a realizar el trabajo; y 3) cualquier tipo de herramientas requeridas, como dados, moldes, herramientas de corte, plantillas o sujetadores y medidores. Además, algunas compañías incluyen estándares de tiempo de ciclos, tiempos de preparación y otros datos en la hoja de ruta.

Núm. de pieza:	Nombre de la pieza:	Revoluciones	
031393	Caja de la válvula	2	Página 1 de 2
Material: 416 Inoxidable	Tamaño: 2.0 diám. × 5.0 long.	Planificador: MPG	Fecha: 3/13/XX

Núm.	Operación	Depto.	Máquina	Herram. calibr.	Tiempo de preparación	Tiempo del ciclo
10	Cara; áspera y torneado de acabado para 1.473 ± 0.003 de diám. × 1.250 ± 0.003 de longitud; chaflán a 0.313 ± 0.002; torneado de acabado para 1.875 ± 0.002 de diám.; formar tres surcos de 0.125 de ancho × 0.063 de profundidad.	L	325	G857	1.9 h	8.22 m
20	Invertido; cara a 4.750 ± 0.005 de longitud; torneado de acabado para 1.875 ± 0.002 de diám.; taladrar orificio axial 1.000 + 0.006, -0.002 de diám.	L	325		0.5 h	3.10 m
30	Taladrar y mandrilar tres orificios radiales en 0.375 ± 0.002 de diám.	D	114	F511	0.3 h	2.50 m
40	Fresar ranura de 0.500 ± 0.004 de ancho × 0.375 ± 0.003 de profundidad.	M	240	F332	0.3 h	1.75 m
50	Fresar plano de 0.750 ± 0.004 de ancho × 0.375 ± 0.003 de profundidad.	M	240	F333	0.3 h	1.60 m

FIGURA 42.3 Hoja de ruta común para especificar el plan del proceso.

Además de la hoja de ruta, en ocasiones se prepara una ***hoja de operaciones*** más detallada para cada una de las actividades enlistadas en la ruta. Ésta la conserva el departamento donde se realiza la operación. Indica los detalles específicos de la operación, como las velocidades de corte, la alimentación, las herramientas y otras instrucciones útiles para el operador de las máquinas. En ocasiones también se incluyen diagramas para la preparación.

Además de su propósito principal, que consiste en especificar la secuencia y dirigir los procesos realizados en la pieza de trabajo, la hoja de ruta puede contener otra información útil para la compañía: 1) estándares de tiempo para cada operación, 2) tiempos de demora en la producción, 3) estimados de los costos de los productos, 4) cuándo deben realizarse inspecciones y 5) la identificación de las herramientas especiales que deben solicitarse.

Planeación de procesos para ensambles Para una producción baja, el ensamble se hace, por lo general, en estaciones de trabajo individuales y un operario o equipo de ellos realiza la tarea de ensamblar los elementos de trabajo para completar el producto. En la producción mediana y alta, por lo general el ensamble se realiza en líneas de producción (sección 41.2). En cualquier caso, hay un orden de precedencia en el cual debe realizarse el trabajo.

La planeación de procesos para el ensamble implica la preparación de las hojas de ensamble que deben seguirse. Para estaciones únicas, la documentación es similar a la hoja de ruta de procesamiento de la figura 42.3. Contiene una lista de los pasos de ensamble y el orden en que deben realizarse. Para la producción de líneas de ensamble, la planeación de procesos consiste en asignar elementos de trabajo a estaciones particulares a lo largo de la línea, un procedimiento denominado ***balanceo de línea*** (sección 41.2.1). En efecto, la línea de ensamble dirige las unidades de trabajo a estaciones individuales y la solución de balanceo de línea determina qué pasos de ensamble deben realizarse en cada estación. Igual que con la planeación de procesos para piezas individuales, deben determinarse las herramientas y soportes necesarios para obtener un elemento de trabajo de ensamble determinado y diseñarse una distribución del lugar de trabajo.

42.1.2 Decisión de hacer o comprar

Inevitablemente, surge la pregunta de si debe adquirirse una pieza con un proveedor externo o hacerse en forma interna. Primero, debe reconocerse que virtualmente todos los fabricantes adquieren sus materiales iniciales con proveedores. Un taller de maquinado compra materia prima en barras a un distribuidor de metales y piezas fundidas. Un moldeador de plásticos obtiene compuestos de moldeado de una compañía química. Una empresa de trabajo en prensa adquiere láminas metálicas de una laminadora. Muy pocas compañías tienen integradas verticalmente todas sus operaciones de producción desde la materia prima hasta el producto terminado.

Dado que una compañía compra al menos algunos de sus materiales iniciales, es razonable preguntarse si la compañía debe comprar las piezas que podrían hacerse en su propia fábrica. La respuesta a la pregunta es la ***decisión de hacer o comprar***. Es muy probable que sea conveniente formular la misma pregunta para cada componente usado por la compañía.

El costo es el factor más importante para decidir si una pieza debe hacerse o adquirirse. Si el vendedor es significativamente más eficiente en los procesos requeridos para hacer el componente, es probable que el costo de producción interno sea mayor que el precio de adquisición, incluso cuando se incluyan las ganancias del vendedor. Por otra parte, si adquirir la pieza produce equipo inactivo en la fábrica, una aparente ventaja de costos para el vendedor puede ser una desventaja para la fábrica. Considere el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 42.1 Comparación de costos por hacer o comprar

Suponga que el precio cotizado para cierto componente por un vendedor es de $8.00 por unidad, para 1000 unidades. La misma pieza hecha en la fábrica costaría $9.00. El desglose de costos en la alternativa de hacer es el siguiente:

Costo de material unitario =	$2.25 por unidad
Mano de obra directa =	$2.00 por unidad
Gastos de la mano de obra al 150% =	$3.00 por unidad
Costo fijo del equipo =	$1.75 por unidad
Total =	$9.00 por unidad

¿Deben comprarse los componentes o hacerse en forma interna?

Solución: Aunque la cotización del vendedor parece favorecer la decisión de comprar, considérese el posible efecto en la fábrica si se decide aceptar la cotización. El costo fijo del equipo es un costo asignado, basado en una inversión que ya se ha hecho. Si el equipo se mantiene ocioso por la decisión de comprar la pieza, podría argumentarse que el costo fijo de $1.75 continúa, incluso si no se usa el equipo. En forma similar, el costo de gastos indirectos de $3.00 que consiste en el espacio de piso de la fábrica, la mano de obra indirecta y otros costos también continuará, incluso si se compra la pieza. Mediante este razonamiento, la decisión de adquirir podría costarle a la compañía hasta $8.00 + $1.75 + $3.00 = $12.75 dólares por unidad si se produce un tiempo de inactividad en la fábrica con la máquina que se hubiera usado para hacer la pieza.

Por otro lado, si el equipo puede usarse para producir otros componentes para los cuales los precios internos son menores que las cotizaciones externas correspondientes, entonces la decisión de comprar tiene un buen sentido económico. ■

Las decisiones de hacer o comprar rara vez son tan claras como en el ejemplo 42.1. Algunos otros factores que participan en la decisión se enlistan en la tabla 42.4. Aunque estos factores parecen subjetivos, todos tienen implicaciones de costos, ya sea en forma directa o indirecta. En años recientes, las compañías importantes han puesto un enorme

TABLA 42.4 Factores importantes en la decisión de hacer o comprar.

Factor	Explicación y efecto sobre la decisión de hacer/comprar
Procesos internos disponibles	Si un proceso dado no está disponible de manera interna, la decisión obvia es comprar. Con frecuencia los vendedores logran eficiencia en un conjunto limitado de procesos que los vuelve competitivos en relación con los costos externos-internos. Hay excepciones para estas directrices, en las cuales una compañía decide que, para su supervivencia a largo plazo, debe lograr eficiencia en una tecnología de procesos de manufactura que no posee en la actualidad.
Cantidad de producción	La cantidad requerida de unidades. Los volúmenes altos tienden a favorecer las decisiones de hacer. Las cantidades bajas tienden a favorecer las decisiones de comprar.
Vida del producto	Una vida de producto larga favorece la producción interna.
Artículos estándar	Los artículos de catálogo estándar, como pernos, tornillos, tuercas y muchos otros tipos de componentes los producen económicamente proveedores que se especializan en ellos; casi siempre es mejor comprarlos.
Confiabilidad del proveedor	Se hacen negocios con el proveedor confiable.
Fuente alternativa	En algunos casos, las fábricas compran piezas a vendedores como una fuente alternativa para sus propias plantas de producción. Éste es un intento de asegurar un abastecimiento continuo de piezas y para equilibrar la producción en periodos de demanda pico.

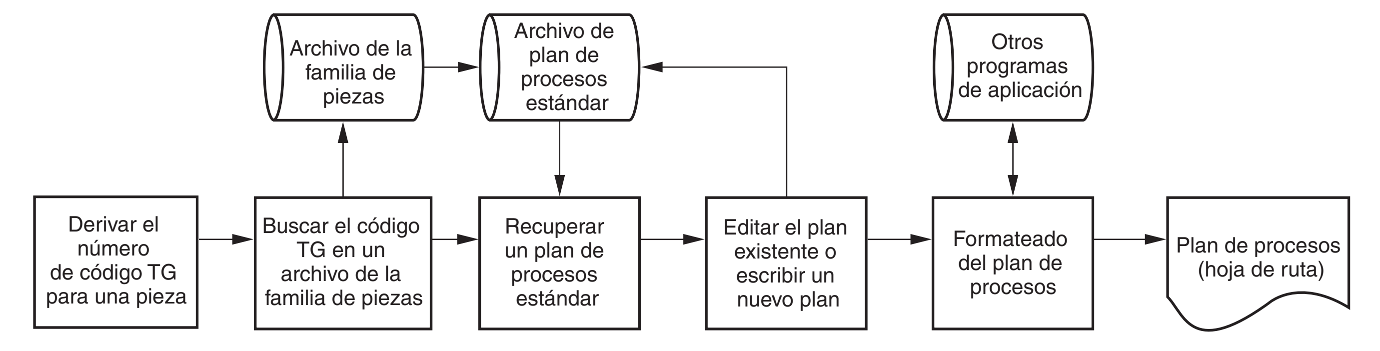
énfasis en implantar relaciones estrechas con los proveedores de piezas. Esta tendencia ha prevalecido especialmente en la industria automotriz, en donde se han alcanzado acuerdos a largo plazo entre cada fabricante de automóviles y una cantidad limitada de vendedores capaces de entregar componentes de alta calidad en forma confiable y a tiempo.

42.1.3 Planeación de procesos asistida por computadora

Durante las últimas dos décadas, ha surgido un considerable interés en la ***planeación de procesos asistida por computadora*** (CAPP, por sus siglas en inglés), la automatización de la función de planeación de procesos mediante sistemas de computadoras. Las personas con conocimientos especializados en los procesos de manufactura se retiran en forma gradual. Se necesita un enfoque alternativo para la planeación de procesos, y los sistemas CAPP proporcionan esta opción. Los sistemas de planeación de procesos asistidos por computadora están diseñados con base en uno de dos enfoques: sistemas de recuperación o sistemas generadores.

Sistemas CAPP de recuperación Los ***sistemas CAPP de recuperación***, también conocidos como ***sistemas CAPP variables***, se basan en la tecnología de grupos y en la clasificación y codificación de piezas (sección 40.1). En estos sistemas, en archivos de computadora se almacena un plan de procesos estándar para cada número de código de piezas. Los planes estándar se basan en los direccionamientos de piezas actuales que se usan en la fábrica o en un plan ideal preparado para cada familia. Los sistemas CAPP de recuperación operan como se indica en la figura 42.4. El usuario empieza por identificar el código TG

FIGURA 42.4 Operación de un sistema de planeación de procesos asistido por computadora del tipo de recuperación. (Fuente: [5].)



del componente para el cual se va a determinar el plan de procesos. Se hace una búsqueda en el archivo de la familia de piezas, para determinar si existe una hoja de ruta estándar para el código de pieza determinado. Si el archivo contiene un plan de procesos para la pieza, se recupera y despliega para el usuario. El plan de procesos estándar se examina para determinar si se requieren modificaciones. Aunque la pieza nueva tenga el mismo número de código, podrían requerirse diferencias menores en los procesos para hacer la pieza. El plan estándar se edita en concordancia con lo anterior. La capacidad de alterar un plan de procesos existentes es la razón por la cual los sistemas CAPP de recuperación también se denominan sistemas variables.

Si el archivo no contiene un plan de procesos estándar para el número de código determinado, el usuario puede buscar el archivo de un número de código similar para el cual exista un funcionamiento estándar. Al editar el plan de procesos existente o al empezar desde cero, el usuario implanta el plan de procesos para la pieza nueva. Éste se convierte en el plan de procesos estándar para el número de código de la pieza nueva.

El paso final es el formateado de plan de procesos, el cual imprime la hoja de ruta en el formato conveniente. El formateador puede pedir otros programas de aplicación, para: determinar condiciones de corte para las operaciones de máquinas herramienta, calcular los tiempos estándar para operaciones de maquinado o calcular estimados de costos.

Sistemas CAPP generadores Éstos son una alternativa para los sistemas de recuperación. Más que recuperar y editar planes existentes de una base de datos, un sistema generador crea el plan de procesos usando procedimientos sistemáticos que puede aplicar un planificador humano. En un sistema CAPP completamente generador, la secuencia de procesos se planea sin asistencia humana y sin planes estándar predefinidos.

El diseño de un sistema CAPP generador es un problema en el campo de los sistemas expertos, una rama de la inteligencia artificial. Los ***sistemas expertos*** son programas de computadora capaces de solucionar problemas complejos que normalmente requieren una persona con años de educación y experiencia. La planeación de procesos se adapta a tal definición. Se requieren varios ingredientes en un sistema CAPP completamente generador:

1. ***Base de conocimientos***. El conocimiento técnico de la manufactura y la lógica que usan los planificadores de procesos exitosos deben capturarse y codificarse en un programa de computadora. Un sistema experto aplicado a la planeación de procesos requiere el conocimiento y la lógica de las personas que planean los procesos para incorporarlas en una base de conocimientos. Después, los sistemas CAPP generadores usan la base de conocimientos para resolver problemas de planeación de procesos; esto es, para crear hojas de ruta.
2. ***Descripción de piezas compatibles con computadoras***. La planeación de procesos generadora requiere una descripción de la pieza compatible con una computadora. La descripción contiene todos los datos pertinentes necesarios para planear la secuencia de procesos. Dos descripciones posibles son: 1) el modelo geométrico de la pieza elaborado en un sistema gráfico computarizado durante el diseño del producto, o 2) un número de código de tecnología de grupos de la pieza que defina sus características en forma detallada.
3. ***Motor de inferencia***. Un sistema CAPP generador requiere la capacidad de aplicar la lógica de planeación y la identificación de los procesos que contiene la base de datos para una descripción de piezas dada. El sistema CAPP aplica su base de datos para resolver un problema específico al planear el proceso para una pieza nueva. En la tecnología de los sistemas expertos, este procedimiento de solución de problemas se denomina motor de inferencia. Usando su base de datos y su motor de inferencia, el sistema CAPP sintetiza un nuevo plan de procesos para cada pieza nueva que se le presenta.

Beneficios de la CAPP Entre los beneficios de este sistema se incluyen los siguientes: 1) la racionalización y la estandarización del proceso, la planeación automatizada produce planes de procesos más lógicos y consistentes que cuando se usa la planeación tradicional de procesos; 2) aumenta la productividad de los planificadores de procesos, el enfoque

sistemático y la disponibilidad de planes de procesos estándar en los archivos de datos permiten al usuario generar una mayor cantidad de planes de procesos; 3) se reduce el tiempo para preparar planes de procesos; 4) mejora la legibilidad en comparación con las hojas de ruta preparadas en forma manual; y 5) capacidad de crear una interfaz en los programas CAPP con otros programas de aplicaciones, como para la estimación de costos, de estándares de trabajo y otros.

42.2 SOLUCIÓN DE PROBLEMAS Y MEJORA CONTINUA

En la manufactura surgen problemas que requieren un apoyo más allá del que normalmente hay disponible en la organización de una línea en los departamentos de producción. Proporcionar este apoyo técnico es una de las responsabilidades de la ingeniería de manufactura. Por lo general, los problemas son específicos para las tecnologías particulares de los procesos que se realizan en el departamento de ingeniería. En el maquinado, los problemas se relacionan con la selección de las herramientas de corte, los soportes que no funcionan adecuadamente, las piezas con condiciones que exceden la tolerancia o condiciones de corte que no son las óptimas. En el moldeado de plásticos, el problema puede ser exceso de rebabas, alta adhesividad de las piezas en los moldes u otros defectos que ocurren en una pieza moldeada. Estos problemas son técnicos y con frecuencia se requiere experiencia en ingeniería para solucionarlos.

En algunos casos, la solución de un problema técnico de manufactura puede requerir un cambio de diseño, por ejemplo, modificar la tolerancia de alguna dimensión de la pieza para eliminar una operación de acabado con esmerilado, al mismo tiempo que se obtiene funcionalidad en la pieza. La ingeniería de manufactura es responsable de generar la solución adecuada al problema y proponer el cambio en la ingeniería al departamento de diseño.

Una de las áreas susceptibles a ser mejoradas es la reducción de tiempos de preparación. Los procedimientos implícitos al cambiar de una preparación de producción a la siguiente (es decir, en la producción por lotes) consumen tiempo y son costosos. Los ingenieros de manufactura son responsables de analizar los procedimientos de cambios y encontrar las formas de reducir el tiempo para realizarlos. Algunos de los enfoques que se usan en la reducción de la preparación se describen en la sección 43.4.

Además de resolver problemas técnicos inmediatos (o como podría decirse “apagar incendios”), el departamento de ingeniería de manufactura también es responsable de proyectos de mejora continua. La mejora continua, llamada ***kaisen*** por los japoneses, significa buscar e instrumentar constantemente los modos de reducir costos, mejorar la calidad y aumentar la productividad en la manufactura. Se realiza un proyecto a la vez. Dependiendo del tipo de área que se analiza, puede implicar un equipo de proyecto cuyos integrantes incluyan no sólo a ingenieros en manufactura, sino también a otros miembros del personal, como diseñadores de productos, ingenieros de calidad y trabajadores de producción. Los proyectos se relacionan con: 1) reducción de costos, 2) mejoramiento de la calidad, 3) mejoramiento de la productividad, 4) reducción del tiempo de preparación, 5) reducción del tiempo de ciclo, 6) reducción del tiempo de manufactura y 7) mejora del diseño del producto para aumentar el rendimiento y el atractivo para el cliente.

42.3 INGENIERÍA CONCURRENTE Y DISEÑO PARA LA MANUFACTURABILIDAD

Gran parte de la función de planeación de procesos descrita en la sección 42.1 se anticipa con decisiones hechas en el diseño de productos. Las decisiones acerca del material, la configuración geométrica de piezas, las tolerancias, el acabado de superficies, el agrupamiento de piezas en subensambles y las técnicas de ensamble limitan la cantidad de procesos de manufactura que pueden usarse para hacer una pieza determinada. Si el ingeniero de producto

diseña una pieza de aluminio fundida en arena con características que sólo pueden obtenerse mediante maquinado (por ejemplo, superficies planas con buenos acabados, tolerancias cerradas y orificios roscados), el planificador de procesos no tiene otra alternativa que especificar un fundido en arena, seguido por la secuencia necesaria de operaciones de maquinado. Si el diseñador de productos especifica un conjunto de estampados en láminas metálicas que se van a ensamblar mediante sujetadores roscados, el planificador de procesos debe establecer la serie de pasos de suajado, perforado y formado para fabricar los estampados y después ensamblarlos. En estos dos ejemplos, una pieza moldeada en plástico puede ser un diseño superior, tanto funcional como económicamente. Es importante que el ingeniero de manufactura actúe como un consejero para el ingeniero de diseño en cuestiones de capacidad de manufactura, debido a que este aspecto no sólo afecta los departamentos de producción sino también a la ingeniería del diseño. Un diseño de producto que es funcionalmente superior y al mismo tiempo puede producirse a un costo mínimo, representa la máxima promesa de éxito en el mercado. Las carreras exitosas en ingeniería de diseño se construyen sobre productos exitosos.

Algunos términos que se asocian frecuentemente con este intento de influir de manera favorable en la manufacturabilidad de un producto son el ***diseño para manufactura*** y el ***diseño para ensamble*** (DFM y DFA por sus siglas en inglés, respectivamente). Por supuesto, el DFM y el DFA están irremisiblemente acoplados, por lo que los llamaremos DFM/A. El ámbito de éste está expandido en algunas compañías para incluir no sólo aspectos de capacidad de manufactura sino también de comercialización, aplicación de pruebas, capacidad de servicio, de mantenimiento. Esta visión más amplia requiere aportaciones de muchos departamentos, además de las de diseño e ingeniería de manufactura. El enfoque se denomina ***ingeniería concurrente***. Este análisis se divide en dos secciones: DFM/A e ingeniería concurrente. El DFM/A es un subconjunto de la ingeniería concurrente.

42.3.1 Diseño para manufactura y ensamble

El ***diseño para manufactura y ensamble*** es un enfoque para el diseño de productos que incluye sistemáticamente consideraciones sobre la manufacturabilidad y la ensamblabilidad en el diseño. El DFM/A incluye cambios organizacionales y principios y directrices de diseño.

Cambios organizacionales en el DFM/A Para implementar el DFM/A, una compañía debe hacer cambios en su estructura organizacional, ya sean formales o informales, con el fin de proporcionar una interacción más cercana y una mejor comunicación entre el personal de diseño y de manufactura. Con frecuencia, esto se consigue formando equipos de proyectos que consisten en diseñadores de productos, ingenieros de manufactura y otros especialistas (por ejemplo, ingenieros de calidad y científicos de materiales) para diseñar el producto. En algunas compañías, se exige que los ingenieros de diseño dediquen cierto tiempo de su carrera a la manufactura para conocer los problemas que se encuentran en la fabricación de las cosas. Otra posibilidad es asignar ingenieros de manufactura al departamento de diseño de productos, como consultores de tiempo completo.

Principios y directrices de diseño El DFM/A también incluye principios y directrices que indican cómo diseñar un producto determinado para una capacidad máxima de manufactura. Muchas de éstas son directrices de diseño universales, como las que se presentan en la tabla 42.5. Son reglas basadas en la experiencia que se aplican a casi cualquier situación de diseño de productos. Además, muchos principios del DFM/A se cubren en capítulos relacionados con procesos de manufactura específicos.

En ocasiones las directrices entran en conflicto. Por ejemplo, una indicación para el diseño de piezas es hacer la forma geométrica lo más sencilla posible. Sin embargo, en el diseño del ensamble, algunas veces son deseables características adicionales de piezas, para evitar el acoplamiento incorrecto de los componentes, así como combinar características de varios componentes ensamblados en una sola pieza para reducir el número de piezas

TABLA 42.5 Principios y directrices generales en el diseño para manufactura y ensamble.

Directriz	Ventajas y oportunidades
Minimizar la cantidad de componentes.	Se reducen los costos de ensamble. El producto final es más confiable porque hay menos conexiones. El desensamble es más sencillo para el mantenimiento y el servicio de campo. Con frecuencia la automatización se facilita debido a la reducción en el número de piezas. Se reduce el trabajo en proceso, así como los problemas de control de inventarios. Deben comprarse menos piezas, lo que reduce los costos por ordenar.
Utilizar componentes estándar disponibles comercialmente.	Se reduce el tiempo y el esfuerzo de diseño. Se evita el diseño de componentes con ingeniería personalizada. Existe una menor cantidad de piezas. Se facilita el control del inventario. Es posible obtener descuentos por cantidad.
Usar piezas comunes a través de las líneas de productos.	Es posible aplicar la tecnología de grupos (capítulo 40). Permite la implantación de celdas de manufactura. Es posible obtener descuentos por volumen.
Diseñar para facilitar la fabricación de piezas.	Pueden ser factibles los procesos de formas netas y casi netas. Simplifica la configuración geométrica de piezas; evita características innecesarias. Deben evitarse los requerimientos de acabado superficial innecesarios porque podría requerirse un procesamiento adicional.
Diseñar piezas con tolerancias que estén dentro de la capacidad de los procesos.	Deben evitarse tolerancias menores que la capacidad de proceso (sección 44.2); de lo contrario, se requerirán procesamiento o clasificación adicionales. Deben especificarse tolerancias bilaterales.
Diseñar el producto para que no puedan cometerse equivocaciones durante el ensamble.	El ensamble no debe ser ambiguo. Los componentes deben diseñarse para que sólo puedan ensamblarse de un modo. En ocasiones deben agregarse características geométricas especiales a los componentes.
Minimizar el uso de los componentes flexibles.	Los componentes flexibles incluyen piezas hechas de hule, cinturones, juntas, cables, etcétera. Los componentes flexibles por lo general son más difíciles de manejar y ensamblar.
Diseñar para facilitar el ensamble.	En piezas coincidentes deben diseñarse características como biseles y ahusamientos. Diseñar el ensamble usando piezas base a la que se agregan otros componentes. El ensamble debe diseñarse para la adición de componentes desde una dirección, por lo general en forma vertical. Los sujetadores roscados (tornillos, pernos, tuercas) deben evitarse siempre que sea posible, en especial cuando se usa ensamble automatizado; en su lugar pueden usarse técnicas de ensamble rápido, como sujeción automática y pegado. Debe minimizarse la cantidad de sujetadores distintos.
Usar un diseño modular.	Cada subensamble debe constar de cinco a 15 piezas. Se facilita el mantenimiento y el servicio en campo. El ensamble automatizado (y manual) se implementa con mayor facilidad. Reduce los requerimientos de inventario. Se minimiza el tiempo de ensamble final.
Formar piezas y productos para facilitar el empaque.	El producto debe diseñarse de manera que puedan usarse cartones para empaque estándar, los cuales son compatibles con el equipo de empaque automatizado. Se facilita el envío al cliente.
Eliminar o reducir los ajustes requeridos.	Los ajustes consumen tiempo en el ensamble. Los ajustes de diseño en el producto implican más oportunidades de que surjan condiciones no ajustadas.

Recopilado de [1], [2], [9].

y el tiempo de ensamble. En estos casos, el diseño para la manufactura de piezas entra en conflicto con el diseño para ensamble y debe encontrarse un punto de equilibrio que consiga el mejor balance entre los lados opuestos del conflicto.

Otras directrices son específicas para una empresa determinada, debido a su capacidad de manufactura particular en relación con sus competidores. Estas capacidades tecnológicas destacables son la suma de las instalaciones con las que cuenta la compañía y de los procesos de manufactura, la competencia técnica de su personal de ingeniería y la capacidad de su fuerza de trabajo. Esto significa que si la organización tiene un excelente equipo de diseño en cierta línea de productos, esta excelencia debe explotarse en la estrategia de desarrollo de productos de la empresa. Significa que la compañía debe diseñar piezas que utilicen los procesos de manufactura con los que cuenta. Significa que si el personal técnico de la organización es especialmente bueno en el diseño de hardware para automatización, debe explotarse esta especialidad en su estrategia general de manufactura. Con frecuencia, una notable competencia tecnológica en la manufactura proporciona más ventajas que una buena capacidad en el diseño de productos. Los competidores pueden usar ingeniería inversa en un producto recién introducido al mercado para conocer secretos que requirieron mucho esfuerzo para crearse. Casi siempre los secretos de procesamiento son más difíciles de descubrir.

Entre los beneficios que se citan de manera típica para el DFM/A están: 1) menor tiempo para llevar el producto al mercado, 2) una transición sin dificultades hacia la producción, 3) menos componentes en el producto final, 4) ensamble más sencillo, 5) menores costos de producción, 6) mayor calidad de productos y 7) mayor satisfacción de los clientes [1], [2].

42.3.2 Ingeniería concurrente

La ***ingeniería concurrente*** se refiere a un enfoque para el diseño de productos en el cual las compañías intentan reducir el tiempo que se requiere para llevar un nuevo producto al mercado, integrando ingeniería de diseño, ingeniería de manufactura y otras funciones en la compañía. El enfoque tradicional para lanzar un nuevo producto tiende a separar las dos funciones, como se ilustra en la figura 42.5*a*). El área de diseño de productos crea el nuevo diseño, en ocasiones sin tomar mucho en cuenta la capacidad de manufactura que posee

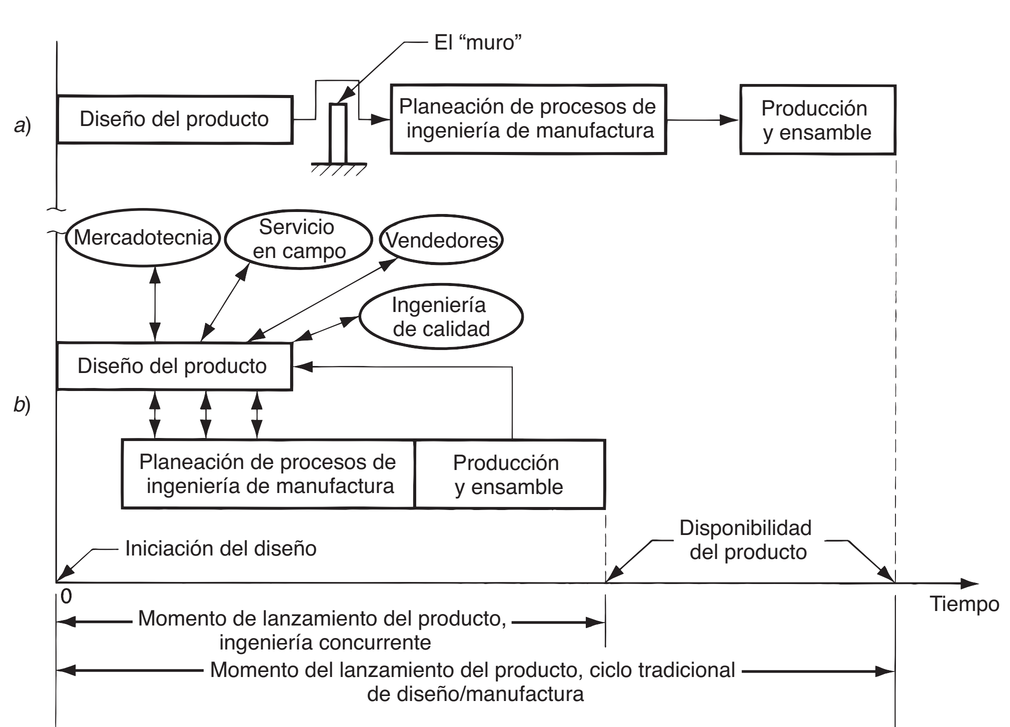


FIGURA 42.5 Comparación de: *a*) ciclo tradicional de creación de producto y *b*) creación de productos usando ingeniería concurrente.

la organización. Hay poca interacción entre los ingenieros de diseño y los de manufactura que podrían brindar consejo sobre estas capacidades y cómo podría alterarse el diseño de productos para integrarla. Es como si existiera un muro entre las dos funciones; cuando la ingeniería de diseño completa su trabajo, lanza los dibujos y especificaciones sobre el muro para que pueda comenzar la planeación del proceso.

En una compañía que practica la ingeniería concurrente (también conocida como ***ingeniería simultánea***), la planeación de manufactura empieza cuando el diseño de producto se está creando, como se muestra en la figura 42.5*b*). La ingeniería de manufactura se involucra muy pronto en el ciclo de desarrollo del producto. Además, también implica otras funciones, como el servicio en campo, la ingeniería de calidad, los departamentos de manufactura, los vendedores que abastecen los componentes importantes y en algunos casos los clientes que usarán el producto. Todas estas funciones pueden contribuir a un diseño de producto que no sólo funcione bien, sino que también sea fácil de fabricar, ensamblar, revisar, probar, recibir servicio, recibir mantenimiento, que esté libre de defectos y sea seguro. Todos los puntos de vista se combinan desde las etapas iniciales para diseñar un producto de alta calidad que produzca la satisfacción de los clientes. Debe haber una inclusión rápida en lugar de conducir un procedimiento en el que se revise el diseño al final y se sugieren cambios después de que es demasiado tarde para integrarlos en forma conveniente; de esta manera, el ciclo total de desarrollo de productos se reduce sustancialmente.

La ingeniería concurrente tiene varios ingredientes: 1) diseño para manufactura y ensamble, 2) diseño para la calidad, 3) diseño para el ciclo de vida y 4) diseño para el costo. Además, se requieren ciertas tecnologías de habilitación para facilitar estos enfoques en la compañía. Estas tecnologías incluyen el diseño y la manufactura asistidos por computadora (CAD/CAM), el correo electrónico (*e-mail*), Internet y la creación rápida de prototipos (capítulo 34).

Podría argumentarse que el ***diseño para la manufactura y el ensamble*** es el aspecto más importante de la ingeniería concurrente, debido a que tiene el mayor impacto en los costos de producción y en el tiempo de desarrollo del producto. Sin embargo, con la creciente importancia de la calidad en la competencia internacional y el éxito comprobado de los países y compañías que han sido capaces de producir productos de alta calidad, debe concluirse que también es muy importante el ***diseño para la calidad*** (DFQ, por sus siglas en inglés). El capítulo 44 está dedicado al tema del control de calidad e incluye un análisis de la calidad en el diseño de productos.

El ***diseño para el ciclo de vida*** se refiere al producto después que se ha fabricado. En muchos casos, un producto puede implicar un costo significativo para el cliente, más allá del precio de compra. Estos costos incluyen la instalación, el mantenimiento y la reparación, las piezas de repuesto, las actualizaciones futuras del producto, la seguridad durante la operación y la disposición del producto al final de su vida útil. Para el cliente, el precio pagado por el producto puede ser una pequeña parte de su costo total cuando se incluyen los costos del ciclo de vida. Algunos clientes (por ejemplo, el gobierno federal) consideran los costos del ciclo de vida en sus decisiones de compra. A menudo, los fabricantes deben incluir contratos de servicio que limitan la vulnerabilidad del cliente al mantenimiento fuera de control y los costos de servicio. En estos casos, deben incluirse estimados exactos de los costos del ciclo de vida en el costo total del producto.

El costo de un producto es un factor importante para determinar su éxito comercial. El costo afecta el precio que se cobra por el producto y el beneficio que se obtiene de él. El ***diseño para el costo del producto*** se refiere a los esfuerzos de una compañía por identificar el impacto de las decisiones de diseño sobre los costos generales de los productos y por controlar éstos mediante un diseño óptimo. Muchas de las directrices del DFM/A se dirigen a reducirlo. Con frecuencia es útil que una compañía desarrolle un modelo de costos del producto para predecir cómo afectarían las alternativas de diseño a los costos de materiales, manufactura e inspección.

REFERENCIAS

[1] Bakerjian, R. y Mitchell, P. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. VI. ***Design for Manufacturability.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1992.

[2] Chang, C-H. y Melkanoff, M. A. ***NC Machine Programming and Software Design,*** 3a. ed. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, N.J., 2005.

[3] Eary, D. F., y Johnson. G. E. ***Process Engineering for Manufacturing***. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962.

[4] Groover. M. P. y Zimmers. E. W., Jr. ***CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing.*** Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984.

[5] Groover, M. P. ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing,*** 2a. ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

[6] Kane, G. E. "The Role of the Manufacturing Engineer." ***Technical Paper MM70-222.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1970.

[7] Koenig, D. T. ***Manufacturing Engineering.*** Hemisphere Publishing Corporation (Harper & Row, Publishers, Inc.). Washington, D.C., 1987.

[8] Kusiak. A. (ed.). ***Concurrent Engineering***. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1993.

[9] Martin, J. M. "The Final Piece of the Puzzle." ***Manufacturing Engineering,*** septiembre de 1988, pp. 46-51.

[10] Nevins, J. L., y Whitney, D. E. (eds.). ***Concurrent Design of Products and Processes.*** McGraw-Hill, Nueva York, 1989.

[11] Tanner, J P. ***Manufacturing Engineering.*** Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1985.

[12] Usher, J. M., Roy, U. y Parsaei, H. R. (eds.). ***Integrated Product and Process Development.*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1998.

[13] Veilleux, R. F. y Petro, L. W. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., vol. V, ***Manufacturing Management.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1988.

PREGUNTAS DE REPASO

42.1. Defina ingeniería de manufactura.

42.2. ¿Cuáles son las principales actividades en la ingeniería de manufactura?

42.3. Identifique algunos de los detalles y decisiones que se incluyen dentro del ámbito de la planeación de procesos.

42.4. ¿Qué es una hoja de ruta?

42.5. ¿Cuál es la diferencia entre un proceso básico y uno secundario?

42.6. ¿Qué es una restricción de precedencia en la planeación de procesos?

42.7. En la decisión de hacer o comprar, ¿por qué puede costar más adquirir un componente de un vendedor que producirlo en forma interna, incluso cuando el precio cotizado por el vendedor es más bajo que el precio interno?

42.8. Identifique algunos factores importantes que deben incluirse en la decisión de hacer o comprar.

42.9. Mencione tres de los principios generales y directrices en el diseño para la manufacturabilidad.

42.10. ¿Qué es la ingeniería concurrente y cuáles son sus componentes importantes?

42.11. Identifique algunas de las tecnologías de habilitación para la ingeniería concurrente.

42.12. ¿Que significa el término "diseño para el ciclo de vida"?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 19 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

42.1 ¿Cuál de las siguientes opciones describe de mejor manera el departamento de ingeniería de manufactura en una organización?: *a*) rama del departamento de ventas, *b*) ingenieros concurrentes, *c*) administración, *d*) diseñadores de productos, *e*) supervisores de producción, o *f*) función del equipo técnico.

42.2. ¿Cuáles de las siguientes son responsabilidades normales del departamento de ingeniería de manufactura? (cuatro mejores respuestas): *a*) asesorar en el diseño para la manufacturabilidad, *b*) planeación de las instalaciones, *c*) mercadotecnia del producto, *d*) administración de planta, *e*) mejoramiento de procesos, *f*) planeación de procesos, *g*) diseño de productos, *h*) solución de problemas técnicos en los departamentos de producción e *i*) supervisión de los trabajadores de producción.

42.3. ¿Cuáles de los siguientes se considerarían procesos básicos, y no procesos secundarios? (cuatro mejores respuestas): *a*) recocido, *b*) anodizado, *c*) taladrado con broca, *d*) galvanoplastia, *e*) extrusión directa en caliente para producir barras de aluminio, *f*) forja con troqueles de impresión, *g*) laminado de hojas de acero, *h*) fundición con arena, *i*) estampado en láminas metálicas, *j*) soldadura de punto, *k*) esmerilado superficial de acero endurecido, *l*) templado de acero martensítico, y *m*) torneado.

42.4. ¿Cuáles de los siguientes se considerarían procesos secundarios, y no procesos básicos? (cuatro mejores respuestas): *a*) recocido, *b*) soldadura con arco, *c*) taladrado con broca, *d*) galvanoplastia, *e*) extrusión para producir componentes automotrices de acero, *f*) forja con troqueles de impresión, *g*) pintado, *h*) moldeado por inyección de plásticos, *i*) laminado de hojas de acero, *j*) fundición con arena, *k*) estampado en láminas metálicas, *l*) sinterizado de polvos cerámicos a presión, y *m*) maquinado ultrasónico.

42.5. ¿Cuáles de las siguientes son operaciones para mejorar las propiedades físicas? (tres respuestas correctas): *a*) recocido, *b*) anodizado, *c*) fundición a troquel, *d*) taladrado con broca, *e*) galvanoplastia, *f*) laminado de aleaciones de níquel, *g*) estirado de láminas metálicas, *h*) sinterizado a presión de polvos cerámicos, *i*) esmerilado superficial de acero endurecido, *j*) templado de acero martensítico, *k*) torneado y *l*) limpieza ultrasónica.

42.6. ¿Cuál de las siguientes es la función principal del documento llamado hoja de ruta?: *a*) mejora continua, *b*) diseño para la manufacturabilidad, *c*) dar autorización a quienes manejan el material para mover la pieza, *d*) procedimiento de inspección de la calidad, *e*) especificación del plan del proceso, *f*) especifica el método detallado para una operación dada.

42.7. En una situación de hacer o comprar, la decisión debe ser comprar el componente siempre que el precio cotizado por el proveedor sea menor que el costo estimado interno para el componente: *a*) verdadero o *b*) falso

42.8. ¿Cuál de los siguientes tipos de planeación de procesos asistida por computadora se basa en la clasificación y codificación de piezas de la tecnología de grupo? *a*) CAPP generadora, *b*) CAPP de recuperación, *c*) planeación tradicional de procesos o *d*) ninguno de los anteriores.

43 PLANEACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

La planeación y el control de la producción son las funciones de apoyo a la manufactura que abordan los problemas logísticos en la fabricación. Con la ***planeación de la producción*** se determinan qué productos van a producirse, en qué cantidades y cuándo. También se consideran los recursos requeridos para realizar el plan. El ***control de producción*** determina si ya se cuenta con los recursos para ejecutar el plan y, si no es así, realiza la acción necesaria para corregir la deficiencia. El ámbito de la planeación y control de la producción incluye el ***control de inventarios***, que se encarga de tener niveles de existencias adecuados de materias primas, trabajo en proceso y artículos terminados.

Los problemas en la planeación y control de la producción difieren en cada tipo de manufactura. Un factor importante es la relación entre la variedad de productos y la cantidad de producción (sección 1.1.2). En un extremo está la ***producción en un taller***, en la cual se producen muchos tipos diferentes de productos en cantidades bajas. Con frecuencia los productos son complejos, tienen muchos componentes y cada uno debe procesarse mediante varias operaciones. Solucionar los problemas logísticos en una planta con tales características requiere una planeación detallada, programar y coordinar la gran cantidad de componentes distintos y los pasos de procesamiento para los diferentes productos.

En el otro extremo está la ***producción masiva***, en la cual un solo producto (tal vez con algunas variaciones limitadas de modelos) se produce en cantidades muy grandes (millones de unidades). Los problemas logísticos en la producción masiva son simples si el

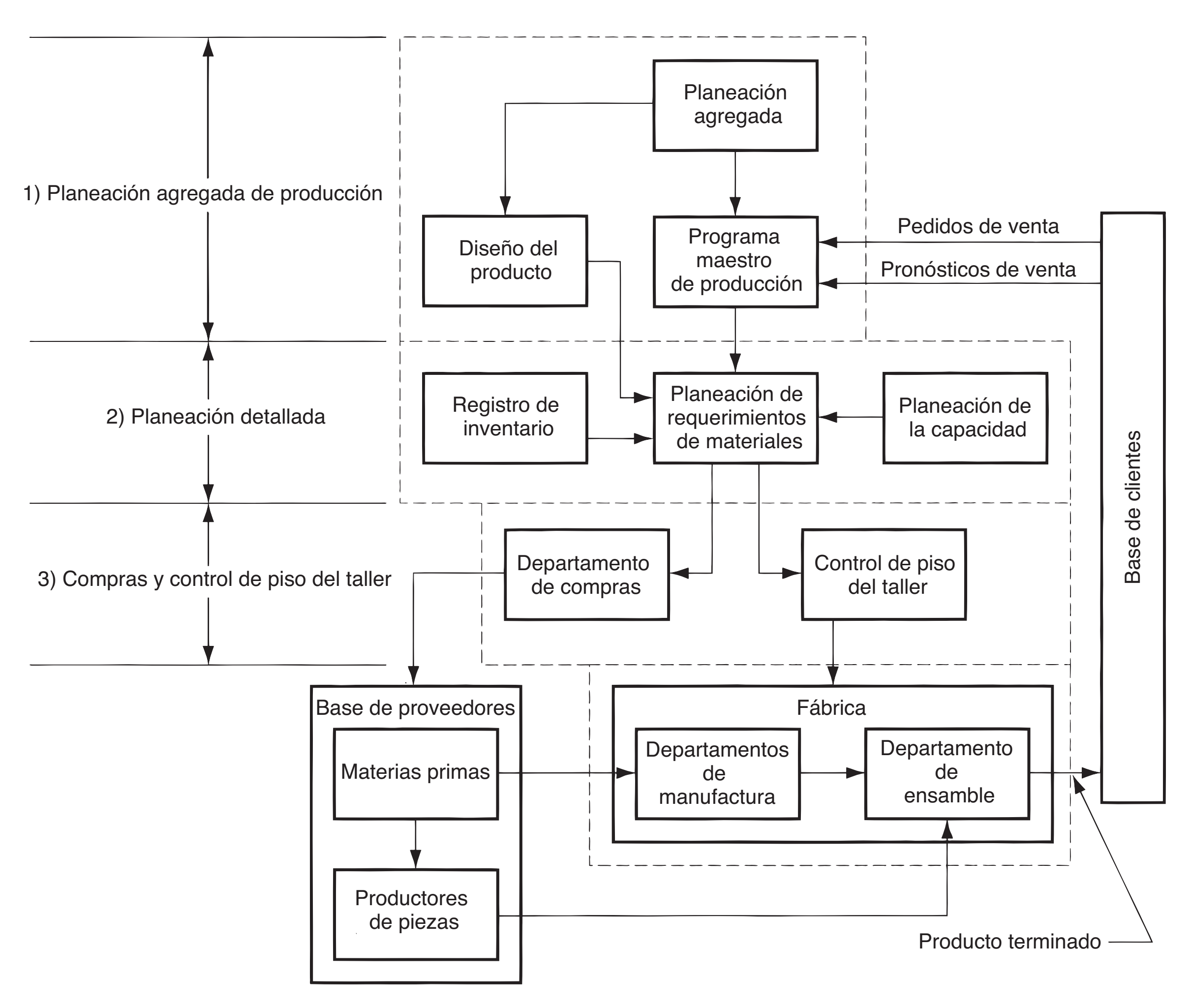


FIGURA 43.1 Actividades en un sistema de planeación y control de la producción.

producto y el proceso lo son. En casos más complejos, el producto es un ensamble que consta de muchos componentes (por ejemplo, los automóviles o los artículos eléctricos) y la instalación está organizada como una línea de producción (capítulo 41). El problema logístico para operar una planta como ésta es llevar cada componente a la estación de trabajo correcta en el momento preciso para que pueda ensamblarse el producto cuando pasa por tal estación. Si este problema no se soluciona, se detiene toda la línea de producción por la falta de una parte crítica.

Para distinguir entre estos dos extremos, en términos de los aspectos en la planeación y el control de la producción, puede decirse que la función de planeación se acentúa en un taller, mientras que la de control destaca en la producción masiva de productos ensamblados. Hay muchas variaciones entre estos dos extremos, cada una con sus diferencias en la forma en que se implementa la planeación y el control de la producción.

En la figura 43.1 se presenta un diagrama de bloques que muestra las actividades de un sistema moderno para la planeación y el control de la producción y sus interrelaciones. Las actividades se dividen en tres fases: 1) planeación agregada de producción, 2) planeación detallada de los requerimientos de materiales y de capacidad y 3) compras y control de piso del taller. El análisis de la planeación y el control de la producción en el presente capítulo se organiza alrededor de este marco de trabajo.

43.1 PLANEACIÓN AGREGADA Y EL PROGRAMA MAESTRO DE PRODUCCIÓN

Cualquier compañía de manufactura debe tener un plan de negocios, el cual debe incluir el tipo, la cantidad y el momento en que se fabricarán los productos. El plan de manufactura debe considerar los pedidos actuales y los pronósticos de ventas, los niveles de inventarios y la capacidad de la planta. Se preparan distintos tipos de planes de manufactura. Una diferencia se da en términos del horizonte de planeación; pueden distinguirse tres categorías: 1) ***planes a largo plazo***, que se refieren a un horizonte de tiempo que está a más de un año de distancia; 2) ***planes a mediano plazo,*** que se relacionan con los periodos de seis meses a un año en el futuro; y 3) ***planes a corto plazo***, que consideran horizontes en el futuro cercano, como días o semanas.

La planeación a largo plazo es responsabilidad de los ejecutivos de máximo nivel de la compañía. Se refiere a las metas y estrategias de la corporación, las líneas de producción futuras, la planeación financiera para el futuro y la obtención de recursos (de personal, de instalaciones y de equipo) necesarios que tendrá la empresa. Conforme se reduce el horizonte de planeación, el plan a largo plazo de la organización debe traducirse en planes a corto y mediano plazos que se vuelvan cada vez más específicos. En el nivel de mediano plazo están el plan agregado de producción y el programa maestro de producción, que se estudian en esta sección. En el corto plazo están la planeación de requerimientos de materiales y de la capacidad y la programación detallada de los pedidos.

En el ***plan agregado de producción*** se indican los niveles de resultados de producción para las principales líneas de productos y no para productos específicos. Debe coordinarse con los planes de ventas y mercadotecnia de la compañía y considerar los niveles actuales de inventarios. Por lo tanto, la planeación agregada es una actividad de planeación corporativa de alto nivel, aunque los detalles del proceso de planeación se delegan al personal. El plan agregado debe integrar los planes de mercadotecnia de los productos actuales y nuevos y los recursos disponibles para esos productos.

Los niveles de resultados planeados para las líneas de productos principales que se enlistan en el programa agregado deben convertirse en un programa muy específico de productos individuales. Esto se denomina el ***programa maestro de producción*** y enlista los productos que se van a fabricar, cuándo deben terminarse y en qué cantidades. Un programa maestro hipotético se ilustra en la tabla 43.1*b*) para un grupo limitado de productos, con el correspondiente plan agregado para la línea de productos de la tabla 43.1*a*).

Los productos enlistados en el programa maestro por lo general se dividen en tres categorías: 1) pedidos de clientes de la compañía, 2) demanda pronosticada y 3) piezas de repuesto. Los pedidos de clientes de productos específicos obligan a la compañía a cumplir con una fecha de entrega que el departamento de ventas le promete a un cliente. La segunda categoría consiste en los niveles de resultados de producción basados en la demanda pronosticada, en la cual se aplican técnicas de predicción estadística a patrones anteriores de demanda, estimados por el personal de ventas y otras fuentes. Con frecuencia, la predicción domina el programa maestro. La tercera categoría es la solicitud de piezas componentes individuales, piezas para reparación que se van a almacenar en el departamento de servicio de la empresa. Algunas compañías excluyen esta tercera categoría del programa maestro porque no representa productos finales.

El programa maestro de producción es un plan a mediano plazo porque debe considerar con anticipación los tiempos requeridos para pedir materia prima y componentes, fabricar las piezas en la fábrica y después ensamblar y probar los productos finales. Dependiendo del tipo de producto, estos tiempos de entrega pueden ser desde varios meses hasta más de un año. Sin embargo, aunque maneja un horizonte a mediano plazo, es un plan dinámico. Por lo general, se considera que es fijo en el corto plazo, lo que significa que no se permiten los cambios en un horizonte aproximado a las seis semanas. Sin embargo, son posibles ajustes en el programa más allá de las seis semanas para manejar cambios en

TABLA 43.1 *a*) Plan agregado de producción y *b*) programa maestro de producción correspondiente para una línea de productos hipotética.

a)

	Semana									
Línea de productos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Modelos P	—	—	—	—	—	—	—	50	150	250
Modelos Q	400	400	400	300	300	300	300	250	250	250
Modelos R	100	100	150	150	200	200	200	250	300	350

b)

	Semana									
Producto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Modelo P1								50	75	100
Modelo P2									50	50
Modelo P3									25	50
Modelo P4										50
Modelo Q1	200	200	200	100	100	100	100	50	50	50
Modelo Q2	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
(etc.)										

la demanda u oportunidades de productos nuevos. En tal caso, debe señalarse que el plan agregado de producción no es la única salida para el programa maestro. Otras situaciones que pueden hacer que se desvíe del plan agregado incluyen pedidos de clientes nuevos y modificaciones en los pronósticos de ventas en un periodo cercano.

43.2 CONTROL DE INVENTARIOS

El control de inventarios se refiere a obtener un equilibrio entre dos objetivos opuestos: 1) minimizar el costo de mantener un inventario y 2) maximizar el servicio a los clientes. Los costos de inventario incluyen los costos de inversión, de almacenamiento y de las obsolescencias o daños posibles. Con frecuencia el costo de inversión es el factor dominante; un caso típico es cuando la compañía invierte dinero prestado a cierta tasa de interés en materiales que todavía no se han entregado al cliente. Todos estos costos se denominan ***costos por mantener inventarios***. La compañía puede minimizar esos costos si mantiene los inventarios en cero. Sin embargo, es probable que esto afecte el servicio a los clientes y decidan hacer negocios en otra parte. Lo anterior representa un costo, denominado ***costo de faltantes***. Una compañía prudente pretende minimizar el costo de faltantes y ofrecer un alto nivel de servicios al cliente. Este último concepto implica tanto 1) los clientes externos (los que generalmente se asocian con esta palabra) y 2) los clientes internos, que son los departamentos operativos, de ensamble final y otras unidades en la organización que dependen de la disponibilidad de materiales y piezas.

43.2.1 Tipos de inventarios

Se encuentran diferentes tipos de inventarios en la manufactura. Las categorías de mayor interés en la planeación y control de la producción son las materias primas, los componentes comprados, el inventario en proceso (trabajo en proceso) y los productos terminados.

Son apropiados diferentes procedimientos de control de inventarios, de acuerdo con el tipo que intentan administrar. Existe una diferencia importante entre los artículos sujetos a una demanda independiente contra los que están sujetos a una ***demanda dependiente***. Ésta significa que el consumo del artículo no se relaciona con la demanda de otros artículos. Los productos finales y las piezas de repuesto experimentan demanda independiente. Los

clientes adquieren productos finales y piezas de repuesto, y sus decisiones para hacerlo no se relacionan con la adquisición de otros artículos.

La ***demanda dependiente*** se refiere al hecho de que la necesidad del artículo se relaciona directamente con la demanda de algo más, en general debido a que el artículo es un componente de un producto final sujeto a demanda independiente. Considere un automóvil, un producto final, para el cual la demanda es independiente. Cada automóvil tiene cuatro neumáticos (cinco si se incluye el de repuesto), la demanda de éstos depende de la del automóvil. En tal caso, los neumáticos que usan los automóviles nuevos son ejemplos de demandas dependientes. Por cada auto hecho en la planta de ensamble final, deben ordenarse cinco neumáticos (llantas). Lo mismo se aplica a miles de otros componentes que se usan en un automóvil. Una vez que se toma la decisión de producir uno nuevo, deben abastecerse todos los componentes para construirlo.

Los neumáticos representan un ejemplo interesante porque no sólo experimentan demanda independiente en el negocio de automóviles nuevos, sino también demanda independiente en el mercado de los neumáticos de repuesto.

Deben usarse diferentes controles de producción e inventario para las demandas independiente y dependiente. Comúnmente se usan procedimientos de predicción para determinar los niveles futuros de producción de productos de demanda independiente. La producción de los componentes que se usan en estos productos se determina directamente de las cantidades de productos que se van a fabricar. Se requieren dos sistemas de control de inventarios distintos para los dos casos: 1) sistemas de punto de orden y 2) planeación de requerimientos de materiales. Los de orden se cubren en la siguiente sección. La planeación de requerimientos de materiales se estudian en la sección 43.3.1.

43.2.2 Sistemas de punto de orden

Éstos enfrentan dos aspectos relacionados que se encuentran al controlar inventarios de artículos de demanda independiente: cuánto pedir y cuándo hacerlo. El primer aspecto, determinar cuántas unidades se deben pedir, se define frecuentemente mediante fórmulas económicas de cantidad de pedidos. El segundo aspecto, cuándo hacer un pedido, se realiza usando puntos de reorden.

Cantidad de orden económica El problema de determinar la cantidad apropiada que debe pedirse o producirse surge en los casos de productos con demanda independiente, en los cuales la demanda del artículo es relativamente constante durante el periodo, bajo consideración y la tasa de producción es significativamente mayor que la tasa de demanda. Ésta es la situación típica de ***fabricar para almacenar***. Se encuentra un problema similar en algunas situaciones de demanda dependiente, cuando el uso de los componentes en el producto final es bastante regular durante un tiempo y es conveniente pagar ciertos costos por conservar inventario, a fin de reducir la frecuencia de las preparaciones. En estas dos situaciones, el nivel de inventario se reduce gradualmente con el tiempo y después se vuelve a llenar a cierto nivel máximo determinado por la cantidad ordenada, como se muestra en la figura 43.2.

Es posible derivar una ecuación de costo total para la suma del costo de mantenimiento de un inventario y el costo de preparación para el modelo de inventario en la figura 43.2. El modelo parece los dientes de una sierra, lo cual representa el consumo gradual del producto hasta llegar a cero, seguido por un reabasto inmediato hasta un nivel máximo Q. Con base en este comportamiento, el nivel de inventario promedio es la mitad del nivel máximo Q. La ecuación del costo total de inventario anual es

$$TIC = \frac{C_h Q}{2} + \frac{C_{su} D_a}{Q} \tag{43.1}$$

donde TIC = costo total de inventario anual (costo por mantener un inventario más costo de pedido), \$/año: Q = cantidad pedida, piezas/pedido; C_h = costo de mantenimiento (costo por mantener el inventario), \$/piezas/año; C_{su} = costo por preparar una orden,

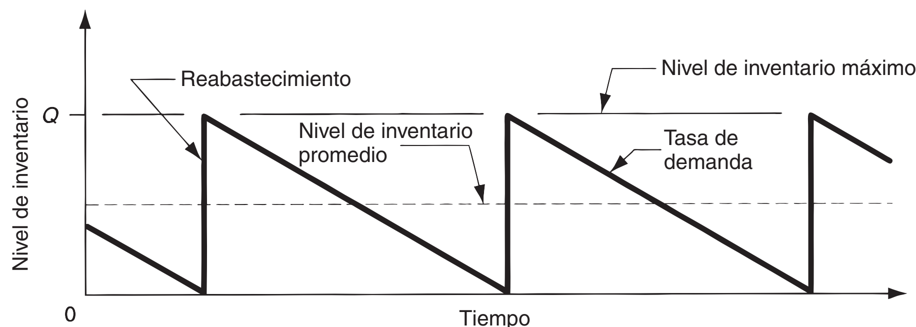


FIGURA 43.2 Modelo del nivel de inventarios durante un periodo en una situación típica de fabricar para almacenar.

\$/preparación o \$/pedido; y D_a = demanda anual del artículo, piezas/año. En la ecuación, la razón D_a/Q = el número de pedidos (lotes de piezas producidas) por año; por lo tanto, proporciona la cantidad de preparaciones por año.

El costo por mantener inventarios C_h, generalmente se considera directamente proporcional al valor del artículo; esto es,

$$C_h = hC_p \tag{43.2}$$

donde C_p = costo por pieza, \$/unidad; y h = razón anual de costo de mantenimiento, la cual incluye cargos de intereses y almacenamiento, $(\text{años})^{-1}$.

El costo de preparación C_{su} incluye el costo del equipo de producción inactivo durante el tiempo de cambios entre lotes, al igual que los costos de mano de obra involucrados en los cambios para preparación. Por tanto:

$$C_{su} = T_{su}C_{dt} \tag{43.3}$$

donde T_{su} = tiempo de preparación o de cambio entre los lotes, h; y C_{dt} = razón de costo de tiempo muerto de las máquinas, \$/h. En los casos donde se solicitan piezas de un vendedor externo el precio que ofrece el vendedor generalmente incluye un costo de preparación, ya sea directamente o en forma de descuentos por cantidad. C_{su} también debe incluir los costos internos que implica el pedido al proveedor.

Debe señalarse que la ecuación (43.1) excluye el costo anual real de la producción de piezas, que es D_aC_p. Si se incluye este costo, el costo total anual está dado por

$$TC = D_aC_p + \frac{C_hQ}{2} + \frac{C_{su}D_a}{Q} \tag{43.4}$$

Si se calcula la derivada de una de las ecuaciones (43.1) o (43.4), se obtiene la fórmula de la cantidad económica de pedido (EOQ, por sus siglas en inglés) que minimiza la suma de los costos por mantener un inventario y los costos de preparación:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2D_aC_{su}}{C_h}} \tag{43.5}$$

donde EOQ = cantidad económica de pedido (cantidad de piezas que deben producirse en el lote), piezas; y los otros términos ya se definieron con anterioridad.

EJEMPLO 43.1 Cantidad económica de pedido

Se produce cierto producto para almacenamiento. La razón de demanda anual es de 12 000 unidades. Una unidad del producto cuesta 10.00 dólares y la razón de costo de mantenimiento = 24%/año. La preparación para producir un lote de productos requiere el cambio de equipo, el cual ocupa cuatro horas. El costo del tiempo muerto del equipo más el de mano de obra = 100 dólares/hora. Determine la cantidad económica de pedido y los costos totales de inventario para este caso.

Solución: El costo de preparación $C_{su} = 4 \times \$100 = \$400$. El costo de mantenimiento por unidad = $0.24 \times \$10 = \$2.40$. Usando estos valores y la razón de demanda anual en la fórmula *EOQ*, se tiene:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2(12\,000)(400)}{2.40}} = 2\,000 \text{ unidades}$$

Los costos totales de inventario se obtienen mediante la ecuación *TIC*:

$$TIC = 0.5(2.40)(2\,000) + 400(12\,000/2\,000 = \$4\,800$$

Incluyendo los costos reales de producción en el costo anual, mediante la ecuación (43.4) se tiene:

$$TC = 12\,000(10) + 4\,800 = \$124\,800$$

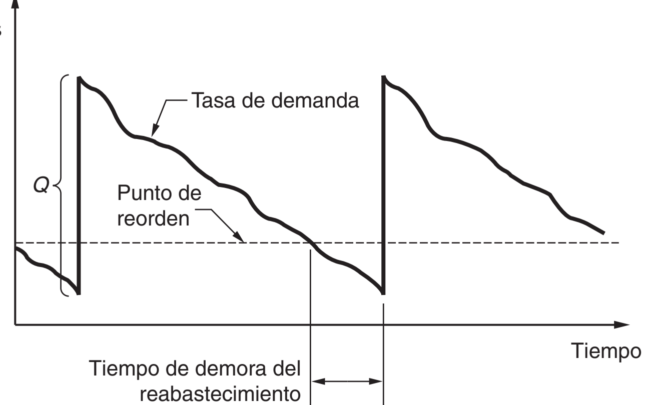
■

La fórmula *EOQ* ha sido un modelo muy usado para decidir las actividades óptimas de producción. Las variaciones de las ecuaciones (43.1) y (43.4) consideran factores adicionales, como la tasa de producción. Aunque no puede discutirse la precisión matemática de la fórmula, es interesante señalar algunas de las dificultades que se encuentran en su aplicación. Una de las dificultades tiene que ver con los valores de los parámetros en la ecuación, a saber los costos de preparación o de pedido y los costos por mantener inventarios. Con frecuencia estos costos son difíciles de evaluar; sin embargo, tienen un efecto importante en el valor *EOQ* calculado.

Una segunda dificultad se relaciona con un dogma equivocado de la filosofía de manufactura que se ha difundido por el uso de la fórmula *EOQ* en Estados Unidos. En él se establece que las corridas de producción grandes representan una estrategia óptima en la manufactura por lotes. No importa cuánto cueste cambiar la preparación, la fórmula proporciona el tamaño óptimo del lote de producción. Entre más alto sea el costo de preparación, más prolongada debe ser la corrida de producción. En gran contraste con el enfoque estadounidense está la solución que se ha planteado en Japón, la cual pone en práctica formas para reducir el costo de preparación, disminuyendo significativamente el tiempo para realizar un cambio. En lugar de requerir horas para terminar un cambio, el tiempo de preparación se reduce a minutos en algunas fábricas. El conocimiento de los éxitos japoneses en esta área ha producido esfuerzos similares para acelerar los cambios de producción en las compañías estadounidenses. La reducción del tiempo de preparación es un componente importante de la producción justo a tiempo y en la sección 43.4 se consideran algunos planteamientos usados para reducir el tiempo de preparación.

Cuándo reordenar La fecha de reorden puede determinarse de varias formas. Primero se describe el sistema de punto de reorden que se usa ampliamente en la industria. Véase la figura 43.3, que proporciona una visión más realista de las variaciones posibles en la tasa de demanda que la figura 43.2. En un ***sistema con punto de reorden***, cuando el nivel de

FIGURA 43.3 Operación de un sistema de inventarios con punto de reorden.



inventarios de cierto artículo baja hasta un punto definido para reorden, es la señal para solicitar el reabasto del artículo. El punto de reorden se establece a un nivel lo suficientemente alto para reducir la probabilidad de que se agoten las existencias durante el periodo entre el punto de reorden y el momento de recibir un nuevo lote.

Las políticas de punto de reorden se llevan a cabo mediante sistemas computarizados de control de inventarios. Estos sistemas se programan para vigilar en forma continua el nivel de los inventarios, conforme se hacen las transacciones, y para generar en forma automática un pedido de un nuevo lote cuando el nivel cae debajo del punto de reorden. Un sistema no computarizado, llamado ***enfoque de dos depósitos***, inicia con dos recipientes del mismo tamaño que se llenan con piezas de cierto tipo, pero las piezas se retiran sólo de uno de los depósitos para satisfacer la demanda. Cuando las existencias en ese depósito se agotan, se hace un pedido para reabastecerlo y se usa el otro recipiente para satisfacer la demanda. Intercambiando de esta manera en un sentido y en otro los dos depósitos se obtiene un método factible y muy sencillo de control de inventarios. En efecto, el punto de reorden está marcado cuando uno de los recipientes se vacía.

43.3 PLANEACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE MATERIALES Y DE CAPACIDAD

A continuación se presentan dos técnicas alternativas para planear y controlar la producción y el inventario. En esta sección se cubren los procedimientos usados para un taller y una producción de rango medio de productos ensamblados. En la sección 43.4, se examinan procedimientos más apropiados para la alta producción.

43.3.1 Planeación de requerimientos de materiales

La ***planeación de requerimientos de materiales*** (MRP, por sus siglas en inglés) es un procedimiento de computación que se utiliza para convertir el programa maestro de producción de productos fínales en un programa detallado de materias primas y componentes que se usan en los productos finales. El programa detallado indica las cantidades de cada artículo, cuándo debe reabastecerse y cuándo entregarse para cumplir con el programa maestro. La ***planeación de requerimientos de capacidad*** (sección 43.3.2) coordina los recursos de mano de obra y equipo con los requerimientos de materiales.

La MRP es más conveniente para talleres y producción por lotes de diversos productos que constan de múltiples componentes, cada uno de los cuales debe adquirirse o fabricarse. Es la técnica apropiada para determinar cantidades de artículos de demanda dependiente que constituyen los inventarios de manufactura: materias primas, piezas compradas, trabajo en proceso, etcétera.

El concepto de la MRP es relativamente directo. Su aplicación se complica por la magnitud de los datos que se van a procesar. El programa maestro especifica la producción de productos finales en términos de entregas mensuales. Cada producto puede contener cientos de componentes. Estos componentes se producen con materias primas, algunas de las cuales son comunes entre los componentes (por ejemplo, láminas de acero para estampados). Algunos de los componentes pueden ser comunes para diversos productos (éstos se denominan ***artículos de uso común*** en la MRP). Para cada producto, los componentes se ensamblan en subensambles simples, que a su vez se agregan para formar otros subensambles y así sucesivamente, hasta terminar el producto final. Cada paso en la secuencia consume tiempo. Todos estos factores deben tomarse en cuenta para la planeación de requerimientos de materiales. Aunque cada cálculo es simple, la gran cantidad de éstos y de datos obligan a que la MRP se implemente por computadora.

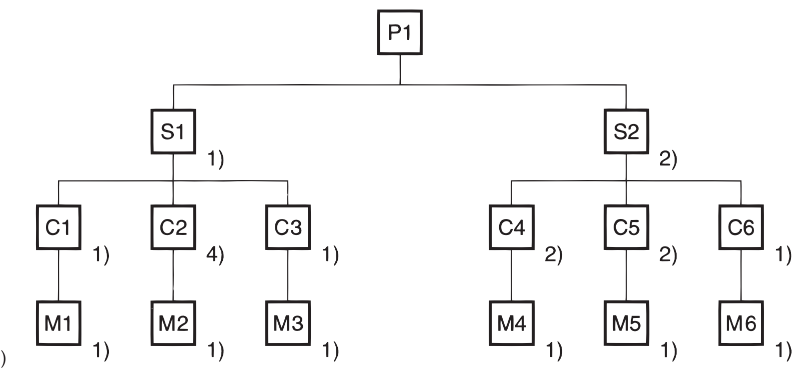


FIGURA 43.4 Estructura de producción para un producto ensamblado P1. (Con base en datos de [3].)

El tiempo de entrega de un trabajo es el tiempo que debe permitirse para completar el trabajo desde el principio hasta el final. Hay dos tipos de tiempos de entrega en MRP: los de entrega de pedido y los de entrega de manufactura. El ***tiempo de entrega de pedido*** es el que se requiere desde el inicio de la solicitud de compra hasta que se recibe el artículo del proveedor. Si el artículo es una materia prima que se obtiene de un vendedor, el tiempo de entrega de pedido debe ser relativamente corto, tal vez algunas semanas. Si el artículo se fabrica, este tiempo puede ser grande, tal vez de varios meses. El ***tiempo de entrega de manufactura*** es el tiempo que se requiere para producir el artículo en la propia planta de la compañía, desde la autorización del pedido hasta su terminación.

Entradas al sistema MRP Para que el procesador MRP funcione adecuadamente, debe recibir entradas de varios archivos: 1) del programa maestro de producción, 2) de los datos de diseño del producto, en la forma de un archivo con la lista de materiales, 3) del registro de inventarios y 4) de la planeación de requerimientos de capacidad. En la figura 43.1 se muestra el flujo de datos hacia el procesador MRP y los recipientes de sus reportes de resultados.

El programa maestro de producción se analizó en la sección 43.1. El ***archivo de la lista de materiales*** contiene las piezas de los componentes y los subensambles que forman cada producto. Se usa para calcular los requerimientos de materias primas y componentes utilizados en los productos finales que enlista el programa maestro. En la figura 43.4 se muestra una estructura (simplificada) de un producto ensamblado. El producto consta de dos subensambles, y cada uno de ellos tiene tres piezas. El número de cada artículo en el siguiente nivel superior de la estructura del producto se indica entre paréntesis.

El ***archivo de registro de inventarios*** identifica cada artículo (por número de pieza) y proporciona un registro con fases de tiempo del estado del inventario. Esto significa que no sólo se enlista la cantidad actual del artículo, sino los cambios futuros que ocurrirán en el nivel de inventario y cuándo sucederán. Los datos incluyen los requerimientos globales del artículo (cuántas unidades se necesitarán para construir productos en el programa maestro), las entregas programadas, el estado en existencia y las liberaciones de pedidos planeadas. Cada uno de estos conjuntos de datos indican los cambios por periodo de tiempo en el programa (por ejemplo, un mes o una semana).

Cómo funciona la MRP Con base en los datos del programa maestro, del archivo de la lista de materiales y del archivo de registro de inventarios, el procesador MRP calcula cuántos componentes y materias primas se necesitarán en los periodos futuros, "explotando" el programa del producto final en niveles sucesivos inferiores en la estructura del producto. Los cálculos del MRP deben manejar varios factores complicados. Primero, las cantidades de componentes y subensambles deben ajustarse para los inventarios actuales o solicitados. Segundo, las cantidades de artículos de uso común deben combinarse durante la separación de piezas para obtener un requerimiento de cada componente y materia prima en el programa. Tercero, las entregas en fases de tiempo de productos finales deben

convertirse en requerimientos de componentes y materiales en fases de tiempo, factorizando los tiempos de entrega adecuados. Debe solicitarse o fabricarse la cantidad requerida de componentes de cada tipo para cada unidad del producto final enlistada en el MPS, tomando en cuenta sus tiempos de entrega de orden o manufactura. Para cada componente, se debe ordenar la materia prima, tomando en cuenta su tiempo de entrega de la orden. Y los tiempos de orden de ensamble deben considerarse en la programación de subensambles y de productos finales.

EJEMPLO 43.2 Planeación de requerimientos de materiales

Considere el procedimiento de planeación de requerimientos para uno de los componentes en el producto P1: C4. Las entregas requeridas por P1 se indican en el programa maestro de producción que se muestra en la tabla 43.1*b*). De acuerdo con la estructura del producto de la figura 43.4, se requieren dos unidades de C4 para hacer el subensamble S2 y se requieren dos unidades S2, para hacer el producto final P1. Se usa una unidad de materia prima M-4 para hacer cada unidad C4. Los tiempos de entrega de pedido, manufactura y ensamble de estos artículos se conocen. Para P1 y S2, el tiempo de entrega es una semana; para C4, el tiempo de entrega es dos semanas; y para M4, el tiempo de entrega es de tres semanas. El estado de inventario de la materia prima M4 es de 50 unidades disponibles actualmente y cero unidades de componentes C4 y S2. No hay requerimientos programados, entregas u autorizaciones de solicitudes indicadas en el registro de inventarios para estos artículos. No se usan el material M4 ni el componente C4 para cualquier otro producto; no son artículos de uso común. Determine los requerimientos en fases de tiempo para M4, C4 y S2, con el fin de cumplir el programa maestro del producto P1. En este problema no se toman en cuenta los pedidos de P1 más allá del periodo 10.

Solución La tabla 43.2 presenta la solución para este problema de MRP. Los requerimientos de entrega de P1 deben desfasarse una semana para obtener las autorizaciones de órdenes planeadas. S2 debe dividirse en dos unidades por unidad P1 y desplazarse una semana para obtener su autorización del pedido. C4 se "explota" en dos unidades por unidad S2 y se desplaza dos semanas para obtener su requerimiento. Y M4 desplaza su tiempo de solicitud de tres semanas para obtener su fecha de autorización, considerando la cantidad de M4 disponible. ■

Reportes de salida y beneficios de la MRP La MRP genera diferentes reportes de salida que se usan en las operaciones de planeación y administración de la planta. Entre los reportes están: 1) las liberaciones de orden, para validar los pedidos planeados por medio del sistema MRP; 2) las liberaciones de orden planeadas en periodos futuros; 3) los avisos de reprogramación, que indican los cambios en las fechas de entrega de órdenes abiertas; 4) los avisos de cancelación, que indican que ciertas órdenes abiertas se han cancelado debido a cambios en el programa maestro; 5) los reportes del estado del inventario; 6) los reportes de rendimiento; 7) los reportes de excepciones, que muestran las desviaciones del programa, las órdenes retrasadas, los desechos, etc.; y 8) los pronósticos de inventarios, que proyectan los niveles del inventario en periodos futuros.

Se obtienen muchos beneficios de un sistema de MRP bien diseñado, éstos incluyen: 1) reducciones de inventarios, 2) respuesta más rápida a cambios en la demanda, 3) costos reducidos de reparación y cambio, 4) mejor utilización de las máquinas, 5) mayor capacidad de respuesta a los cambios en el programa maestro y 6) ayuda en el desarrollo del programa maestro. A pesar de estas consideraciones, los sistemas MRP se han instrumentado en la industria con diversos grados de éxito. Algunas razones por las cuales no han tenido éxito son: 1) aplicación inadecuada, 2) cálculos de MRP basados en datos imprecisos y 3) ausencia de planeación de capacidad.

43.3.2 Planeación de requerimientos de capacidad

La ***planeación de requerimientos de capacidad*** se relaciona con la determinación de los requerimientos de mano de obra y equipo necesarios para cumplir el programa maestro

TABLA 43.2 Solución a los requerimientos de materiales del ejemplo 42.2.

Periodo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Artículo: **Producto P1**											
Requerimientos generales									**50**	**75**	**100**
Entregas programadas											
En existencia	**0**										
Requerimientos netos									**50**	**75**	**100**
Liberaciones de pedido planeadas								**50**	**75**	**100**	
Artículo: **Subensamble S2**											
Requerimientos generales								**100**	**150**	**200**	
Entregas programadas											
En existencia	**0**										
Requerimientos netos								**100**	**150**	**200**	
Liberaciones de pedido planeadas							**100**	**150**	**200**		
Artículo: **Componente C4**											
Requerimientos generales							**200**	**300**	**400**		
Entregas programadas											
En existencia	**0**										
Requerimientos netos							**200**	**300**	**400**		
Liberaciones de pedido planeadas					**200**	**300**	**400**				
Artículo: **Materia prima M4**											
Requerimientos generales					**200**	**300**	**400**				
Entregas programadas											
En existencia	**50**	**50**	**50**	**50**	**50**						
Requerimientos netos					**150**	**300**	**400**				
Liberaciones de pedido planeadas		**150**	**300**	**400**							

de producción. También se relaciona con la identificación de las necesidades de capacidad futuras a largo plazo de la empresa. La planeación de la capacidad también sirve para identificar las limitaciones de recursos de producción, con el fin de planear un programa maestro de producción realista.

Un programa maestro realista debe ser compatible con la capacidad de manufactura de la planta que fabricará los productos. La empresa debe estar consciente de su capacidad de producción y debe planear los cambios en la capacidad para cumplir con los requerimientos de producción cambiantes que se especifican en el programa maestro. En la figura 43.1 se muestra la relación entre la planeación de la capacidad y otras funciones en la planeación y el control de la producción. El programa maestro se reduce a requerimientos de materiales y de componentes usando la MRP. Estos requerimientos proporcionan estimados de las horas de mano de obra y otros recursos necesarios para producir los componentes. Después se comparan los recursos con la capacidad de la planta en el horizonte de

planeación. Si el programa maestro no es compatible con la capacidad de la planta, deben hacerse ajustes en el programa o en la capacidad de la planta.

La capacidad de la planta puede ajustarse a corto y a largo plazos. Entre los ajustes a la capacidad a corto plazo están 1) los ***niveles de empleo,*** aumentando o disminuyendo la mano de obra directa en la planta de acuerdo con los cambios que se generan en los requerimientos de capacidad; 2) las ***horas por turno***, aumentando o disminuyendo la cantidad de horas de mano de obra por turno de producción mediante el uso de tiempo extra u horarios reducidos; 3) el ***número de turnos de trabajo***, aumentando o disminuyendo el número de turnos por periodo de producción, pueden autorizarse horarios nocturnos o de fin de semana; 4) la ***acumulación de inventario***, esta táctica se usa para conservar niveles de empleo estables durante periodos de demanda lenta; 5) el ***retraso de pedidos,*** las entregas al cliente se retrasan durante periodos muy ocupados cuando los recursos de producción no son suficientes para cubrir la demanda y 6) la ***subcontratación,*** lo cual implica contratar el trabajo de talleres externos durante periodos muy ocupados o aceptando trabajo adicional durante periodos de poca demanda.

Los ajustes de la capacidad a largo plazo incluyen cambios posibles en la capacidad de producción que generalmente requieren periodos largos, incluyendo los siguientes tipos de decisiones: 1) ***equipo nuevo,*** es decir, inversiones en máquinas adicionales, maquinaria más productiva o nuevos tipos de máquinas para cubrir los cambios futuros en el diseño de productos; 2) ***plantas nuevas,*** construcción de plantas nuevas o la adquisición de las plantas de otras compañías; 3) ***cierre de plantas,*** clausura de plantas que no se necesitarán en el futuro.

43.4 PRODUCCIÓN JUSTO A TIEMPO Y AJUSTADA

La producción ***justo a tiempo*** (JIT, por sus siglas en inglés) es un enfoque para la producción que fue implantado en Japón con el fin de reducir los inventarios. Los japoneses consideran el trabajo en proceso y otros inventarios como un desperdicio que debe eliminarse. El inventario retiene fondos de inversión y espacio (este último aspecto es mucho más apreciado en Japón que en Estados Unidos). Para reducir esta forma de desperdicio, el enfoque JIT incluye varios principios y procedimientos dirigidos a reducir los inventarios, ya sea en forma directa o indirecta. De hecho, el alcance del enfoque JIT es tan amplio que con frecuencia se considera una filosofía. El JIT es un componente importante de la "producción ajustada", que tiene como una de sus metas principales reducir el gasto en las operaciones de producción.[1] La ***producción ajustada*** puede definirse como "una adaptación de producción en masa en las que los trabajadores y las celdas de trabajo son más flexibles y eficientes al adoptar métodos que reducen el gasto en todas las formas".[2]

En años recientes, la filosofía JIT ha abarcado a muchas compañías de manufactura de Estados Unidos. En ocasiones, se le han añadido otros términos para darle un estilo estadounidense o para señalar ligeras diferencias con las prácticas japonesas del JIT. Estos términos incluyen ***inventario cero*** (de la American Production and Inventory Control Society), ***manufactura de flujo continuo*** (de la IBM Corporation) y ***sistema de producción de inventario cero*** (de la General Electric Company).

Los procedimientos justo a tiempo han demostrado ser más eficaces en la manufactura repetitiva de alto volumen, como en la industria automotriz [4]. El potencial para la acumulación de inventarios en proceso en este tipo de manufactura es significativo porque las cantidades de productos y el número de componentes por producto son grandes. Un sistema justo a tiempo produce exactamente la cantidad correcta de cada componente requerido para satisfacer la siguiente operación en la secuencia de manufactura, exactamente

[1]El término "producción inclinada" fue acuñado por investigadores del Massachusetts Institute of Technology para describir los programas adoptados por la Toyota Motors con el fin de mejorar las eficiencias de producción y la calidad de los productos.

[2]M.P. Groover, ***Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*** [3], p. 834.

cuando se necesita el componente, “justo a tiempo”. Para los japoneses, el tamaño de lote ideal es una pieza. Como una cuestión práctica, se produce más de una pieza a la vez, pero el tamaño del lote se conserva pequeño. Bajo JIT, se debe evitar la producción de demasiadas unidades así como la producción de muy pocas. Ésta es una disciplina de producción que contrasta marcadamente con la práctica tradicional de Estados Unidos, la cual ha promovido el uso de grandes inventarios en proceso para enfrentar problemas tales como averías de máquinas, componentes defectuosos y otros obstáculos para una producción regular. El enfoque estadounidense podría describirse como una filosofía “sólo en caso” (*just-in-case* en lugar de *just-in-time*).

Aunque el tema principal en el JIT es la reducción de inventarios, éste no se logra simplemente por mandato. Para hacerlo posible deben cumplirse varios requisitos, entre ellos están: 1) programas estables de producción; 2) tamaños de lotes pequeños y tiempos de preparación breves; 3) entregas a tiempo; 4) componentes y materiales libres de defectos; 5) equipo de producción confiable; 6) sistema continuo de control de la producción; 7) fuerza de trabajo capaz, comprometida y cooperativa; y 8) base de proveedores confiable.

Programa estable Para que el JIT tenga éxito, el trabajo debe fluir con regularidad y con las mínimas perturbaciones en las operaciones normales. Las perturbaciones provocan cambios en los procedimientos de operación, aumentos y disminuciones en la velocidad de producción, preparaciones no programadas, variaciones de las rutinas de trabajo regulares y otras excepciones. Las perturbaciones en las operaciones al final del flujo (es decir, ensambles finales) tienden a amplificarse en las operaciones iniciales (es decir, alimentación de piezas). Un programa maestro de producción que permanece relativamente constante durante largos periodos es una forma de obtener un flujo de trabajo regular y minimizar las perturbaciones y cambios en la producción.

Tamaños de lote pequeños y reducción de la preparación Dos requerimientos para minimizar los inventarios son los tamaños pequeños de lotes y los tiempos de preparación cortos. Se examinó la relación entre el tamaño de lote y el tiempo de preparación en la fórmula EOQ de la ecuación (43.5). Los japoneses tienen la fórmula EOQ. La tomaron de Estados Unidos. Pero en lugar de usarla para calcular cantidades de lotes, enfocan sus esfuerzos en encontrar las maneras de reducir el tiempo de preparación, lo cual permite lotes más pequeños y niveles más bajos de trabajo en proceso. Las compañías de manufactura estadounidenses también están adoptando la reducción de la preparación como una meta. Algunos enfoques que se usan para reducir el tiempo de preparación incluyen: 1) realizar la mayor parte de preparación posible, mientras todavía se está realizando el trabajo anterior; 2) usar dispositivos de sujeción de acción rápida en lugar de pernos y tuercas; 3) eliminar o minimizar los ajustes en la preparación; y 4) usar tecnología de grupos y manufactura celular para que los estilos de piezas similares se produzcan en el mismo equipo.

Entrega a tiempo, cero defectos y equipo confiable El éxito de la producción justo a tiempo requiere casi la perfección en la entrega oportuna, la calidad de las piezas y la confiabilidad del equipo. Los tamaños pequeños de lotes y los almacenamientos intermedios de piezas que se usan en JIT requieren que las piezas se entreguen antes de que ocurra un desabasto en las estaciones finales del proceso. De lo contrario, la producción se suspendería en estas estaciones por falta de piezas. Si las piezas entregadas tienen defectos, no pueden usarse para ensambles. Esto tiende a promover cero defectos en la fabricación de piezas. Los trabajadores revisan sus propios resultados para asegurarse que estén correctos antes de avanzar a la siguiente operación. Un sistema de producción JIT no tolera máquinas que se descomponen. Esto enfatiza la necesidad de diseños de equipo confiable y la aplicación del mantenimiento preventivo.

Sistema continuo de control de la producción El esquema JIT requiere un ***sistema continuo*** de control de la producción, en el cual la orden para producir piezas en determinada estación proviene de la siguiente estación que usa tales piezas. Conforme se agota el abasto de piezas en una estación dada, ésta coloca un “pedido de piezas” en la estación anterior

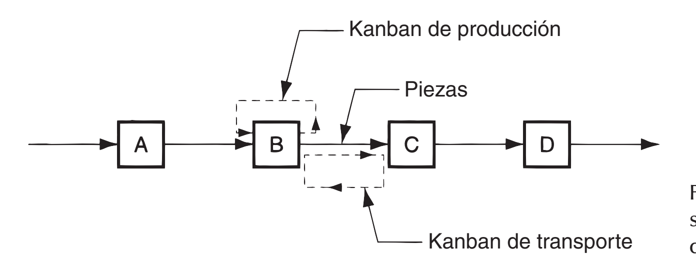


FIGURA 43.5 Operación de un sistema kanban entre estaciones de trabajo.

para reabastecerse. Esta orden proporciona la autorización a la estación anterior para producir las piezas necesarias. Este procedimiento, que se repite en cada estación por toda la planta, tiene el efecto de que las piezas se mueven en forma continua por el sistema de producción. En contraste, un ***sistema de refuerzo*** de producción opera proporcionando piezas a cada estación en la planta, lo cual dirige el trabajo de las estaciones iniciales a las finales. El MRP es un sistema de producción. El riesgo en un sistema de refuerzo de producción es sobrecargar la fábrica, programando más trabajo del que puede manejar. Esto provoca en largas filas de piezas frente a máquinas que no pueden realizar el trabajo pendiente. Un sistema MRP mal instrumentado, que no incluya ninguna planeación de la capacidad, manifiesta este riesgo.

Un sistema continuo famoso es el ***kanban*** que usa Toyota, la compañía automotriz japonesa. Kanban es una palabra japonesa que significa ***tarjeta.*** El sistema de control de la producción kanban se basa en el uso de tarjetas para autorizar la producción y el flujo de trabajo en la planta. Existen dos tipos de kanban: 1) de producción y 2) de transporte. Un ***kanban de producción*** autoriza la elaboración de un lote de piezas. Las piezas se colocan en contenedores, de modo que el lote debe consistir sólo en las piezas suficientes para llenar el contenedor. No se permite la producción de piezas adicionales. Un ***kanban de transporte*** autoriza el movimiento del contenedor de piezas a la siguiente estación en la secuencia.

Observe la figura 43.5 mientras se explica cómo operan dos estaciones de trabajo en un sistema kanban, donde una alimenta a la otra. La figura muestra cuatro estaciones, pero aquí se hará énfasis en la B y la C. La estación B es la que provee a este par, y la estación C es el cliente. La estación C alimenta a la estación D. Y la estación B es alimentada por la estación A. Cuando la estación C empieza a trabajar con un envase lleno, un trabajador retira el kanban de transporte del envase y lo regresa a B. El trabajador encuentra un envase lleno de piezas en B que se acaban de producir, retira el kanban de producción del envase y lo coloca en un estante en B. Después, coloca el kanban de transporte en el envase lleno, el cual autoriza su movimiento a la estación C. El kanban de producción en el estante de la estación B autoriza la producción de un nuevo lote de piezas. La estación B produce más de un estilo de pieza, tal vez para varias estaciones hacia abajo en la línea, además de C. La programación del trabajo se determina mediante el orden en el cual se colocan los kanbans de producción en el estante.

El sistema continuo de kanbans entre las estaciones A y B y entre las estaciones C y D funciona igual que lo hace entre las estaciones B y C, descritas aquí. Este sistema de control de producción evita papeleo innecesario. Se usan las tarjetas una y otra vez, en lugar de generar nuevas órdenes de producción y transporte en cada ciclo. Una desventaja evidente es la considerable mano de obra involucrada en el manejo del material (mover las tarjetas y envases entre las estaciones): sin embargo, se dice que esto promueve la colaboración y el trabajo en equipo entre los trabajadores.

Fuerza de trabajo y base de proveedores Otro requisito de un sistema de producción JIT es que los trabajadores sean cooperativos, comprometidos y capaces de realizar varias tareas. La fuerza de trabajo debe ser flexible para producir diversos estilos de piezas en las estaciones de alimentación, para revisar la calidad de sus trabajos y para manejar problemas técnicos menores con el equipo de producción, de modo que no ocurran desperfectos importantes.

El esquema justo a tiempo se extiende a los proveedores de materiales y componentes de la empresa. Los proveedores deben cumplir las mismas normas de entrega a tiempo, cero defectos y otros requisitos JIT, de la misma forma que la compañía. Algunas políticas de ventas que usan las organizaciones para instrumentar esquemas JIT incluyen: 1) reducir el número total de proveedores, 2) seleccionar proveedores con registros comprobados de cumplimiento de las normas de calidad y de entrega, 3) establecer sociedades a largo plazo con proveedores y 4) seleccionar proveedores que se localicen cerca de la planta de manufactura de la compañía.

43.5 CONTROL DE PISO DEL TALLER

La tercera fase en la planeación y el control de la producción (figura 43.1) se relaciona con la autorización de órdenes de producción, monitorear y controlar el avance de las órdenes y obtener información actualizada sobre el estado de los pedidos. El departamento de adquisiciones es el responsable de estas funciones entre los proveedores. El término ***control de piso del taller*** se emplea para describir estas funciones, cuando se realizan en las fábricas de la propia compañía. En términos básicos, el control de piso del taller se relaciona con la administración del trabajo en proceso de la fábrica. Es más importante en el trabajo de taller y en la producción por lotes, en donde hay varias solicitudes diferentes en el taller que deben programarse y rastrearse de acuerdo con sus prioridades relativas.

Un sistema típico de control de piso del taller tiene tres módulos: 1) liberación de pedidos, 2) programación de pedidos y 3) progreso de los pedidos. Los tres módulos y su interrelación con otras funciones en la fábrica se muestran en la figura 43.6. Se realizan mediante una combinación de sistemas de computadoras y recursos humanos.

Liberación de pedidos La liberación de pedidos en el control de piso del taller genera los documentos necesarios para procesar una orden de producción en la fábrica. En ocasiones los documentos se denominan el paquete del taller; por lo regular constan de: 1) la hoja de ruta, 2) las requisiciones para comprar los materiales iniciales en las tiendas, 3) las tarjetas de empleados para reportar el tiempo de mano de obra directa utilizado en el pedido, 4) las boletas de desplazamiento para autorizar el transporte de piezas a centros de trabajos subsecuentes en la ruta de producción y 5) las listas de piezas, requeridas para trabajos de ensamble. En una fábrica tradicional, estos documentos se mueven junto con la orden de producción y se usan para registrar su avance por el taller. En las fábricas modernas, se usan métodos automatizados como la tecnología de código de barras para vigilar el estado de una solicitud, la cual hace innecesarios algunos de estos documentos en papel.

La liberación de pedidos se controla mediante dos datos principales, como se indica en la figura 43.6: 1) la planeación de requerimientos de materiales, la cual autoriza la producción y 2) una base de datos de ingeniería y manufactura, que indica la estructura del producto y los detalles de la planeación del proceso que se requieren para generar los documentos que acompañan la orden a través del taller.

Programación de pedidos En esta etapa se asignan los pedidos de producción a los centros de trabajo en la fábrica. Atiende la función de despacho en la planeación y control de la producción. En la programación de órdenes, se prepara una lista de despacho que indica qué pedidos deben procesarse en cada centro de trabajo. También proporciona las prioridades relativas para diferentes trabajos, por ejemplo, mostrando las fechas de entrega de cada trabajo. La lista de despacho ayuda al supervisor del departamento a asignar trabajos y recursos a fin de cumplir con el programa maestro.

La programación de pedidos en el control de piso del taller enfrenta dos problemas en la planeación y control de la producción: carga de máquinas y secuenciación de actividades de trabajo. Para programar las órdenes de producción en la fábrica, primero deben asignarse a los centros de trabajo. La asignación de las órdenes a los centros de trabajo se denomina ***carga de las máquinas***. La carga de todos los centros de trabajo en la planta

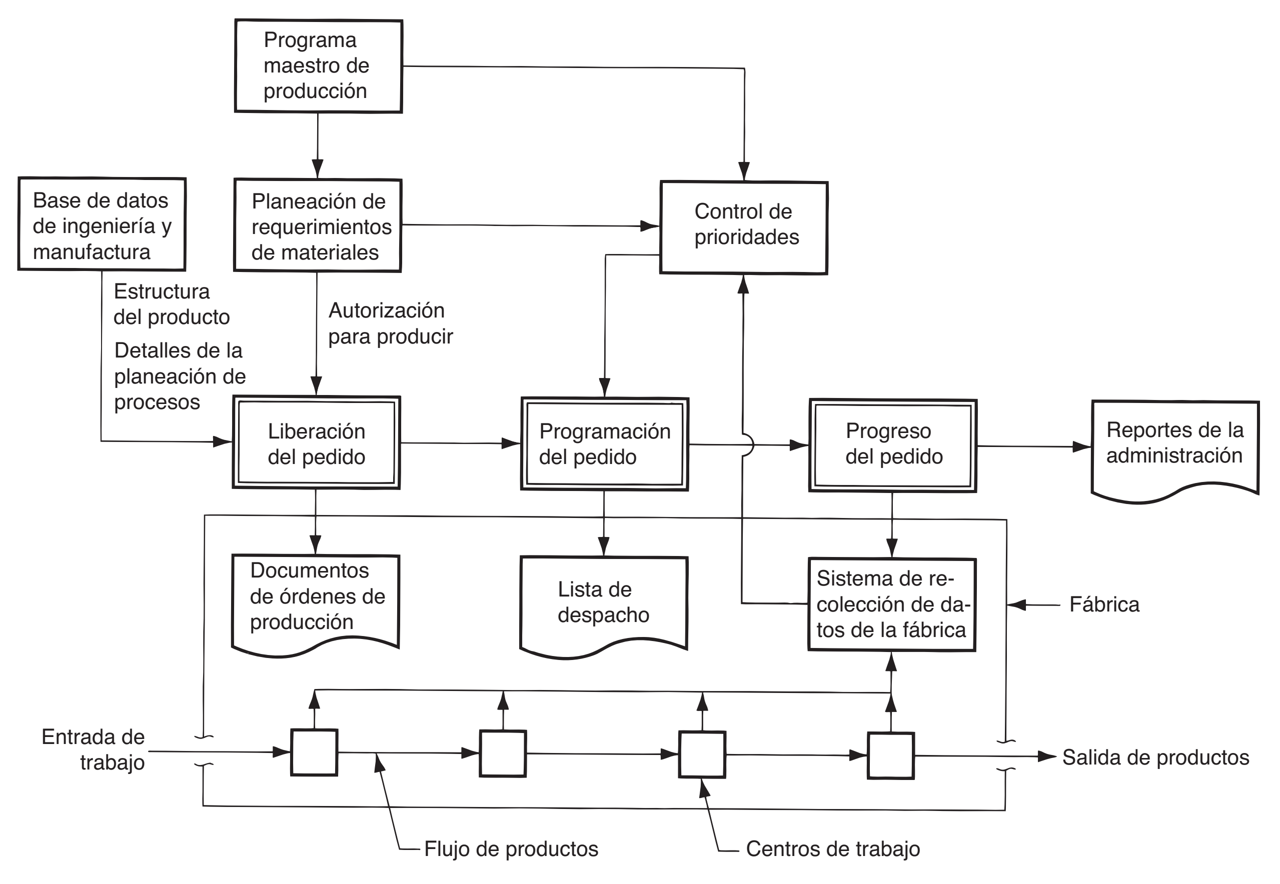


FIGURA 43.6 Tres módulos en un sistema de control de piso del taller y las interconexiones con otras funciones de planeación y control de la producción.

se denomina ***carga del taller***. Como es probable que la cantidad de órdenes de producción exceda la cantidad de centros de trabajo, cada centro de trabajo tendrá una fila de órdenes en espera de ser procesadas. Una máquina de producción determinada puede tener de 10 a 20 actividades en espera de ser procesadas.

La ***secuenciación de actividades*** es el problema de decidir el orden en el cual se procesan las actividades en una máquina determinada. La secuencia de procesamiento se decide mediante prioridades entre las actividades en la fila. Las prioridades relativas se determinan mediante una función llamada ***control de prioridad***. Algunas de las reglas que se usan para establecer las prioridades en las órdenes de producción de una planta son 1) ***primero en llegar primero en atenderse***, las órdenes se procesan en la secuencia en la que llegan al centro de trabajo; 2) ***fecha de entrega más próxima***, las órdenes con fecha de entrega más próximas reciben prioridades más altas; 3) ***tiempo de procesamiento más breve***, las órdenes con tiempos de procesamiento más corto reciben prioridades más altas; 4) ***menor tiempo de inactividad***, las órdenes con la mínima actividad en su programa reciben prioridades más altas (el tiempo de inactividad se define como la diferencia entre el tiempo que queda hasta la fecha de entrega y el tiempo de procesamiento restante); ***razón crítica***, las solicitudes con la razón crítica más baja reciben prioridades más altas (la razón crítica se define como la razón del tiempo que queda hasta la fecha de entrega dividida entre el tiempo de procesamiento restante).

Las prioridades relativas de los pedidos pueden cambiar con el tiempo. La demanda esperada puede ser más alta o más baja para ciertos productos, pueden ocurrir desperfectos en el equipo que produzcan retrasos en la producción, los pedidos pueden cancelarse y o puede haber materias primas defectuosas. El control de prioridad revisa las prioridades relativas en las órdenes de producción y ajusta la lista de despacho de acuerdo con ellas. Cuando se termina una orden en un centro de trabajo, se mueve a la siguiente máquina en

su ruta. La orden se vuelve parte de la carga de máquina para el siguiente centro de trabajo y usa de nuevo el control de prioridad para determinar la secuencia entre los trabajos que se van a procesar en esa máquina.

Progreso del pedido El progreso del pedido en el control de piso de taller monitorea el estado de las órdenes, el trabajo en proceso y otros parámetros en la planta que indican avance y rendimiento de la producción. El objetivo del avance de órdenes es proporcionar información para administrar la producción con base en los datos recopilados de la fábrica.

Existen varias técnicas para reunir datos de las operaciones de la fábrica, entre ellas están los procedimientos de oficina, los cuales requieren que los trabajadores registren los datos en formatos de papel, que posteriormente se integran con técnicas completamente automatizadas que no requieren participación humana. En ocasiones se usa el término ***sistema de recopilación de datos de la fábrica*** para identificar estas técnicas. En [3] se presenta una cobertura más completa de este tema.

La información que se presenta a la administración frecuentemente se resume en la forma de reportes. Entre los reportes están 1) ***reportes de estado de órdenes de trabajo***, los cuales indican el estado de las órdenes de producción, incluyendo el centro de trabajo actual donde se ubica cada orden, las horas de procesamiento que faltan para terminar la orden, si las actividades están a tiempo o no y el nivel de prioridad; 2) ***reportes de progreso***, que informan del desempeño del taller durante cierto periodo de tiempo, por ejemplo, una semana o un mes, cuántas solicitudes se terminaron durante el periodo, cuántas se deberían haber realizado pero no se terminaron, etc.; y 3) ***reportes de excepciones***, que indican las desviaciones del programa de producción, como retrasos en las tareas. Estos reportes son útiles en la toma de decisiones de la administración, como la asignación de recursos, la autorización de tiempo extra y la identificación de áreas problemáticas que afectan adversamente el funcionamiento del programa maestro de producción.

REFERENCIAS

[1] Bedworth, D. D. y Bailey, J. E. ***Integrated Production Control Systems***, 2da. ed. John Wiley & Sons, Nueva York, 1987.

[2] Chase, R. B. y Aquilano. N. J. *et al*. ***Production and Operations Management*****,** 10ma. ed. McGraw-Hill-Irwin, Boston, 2001.

[3] Groover, M. P. ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*****,** 2a. ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

[4] Monden, Y. ***Toyota Production System*****,** 3a ed. Engineering and Management Press, Norcross, Georgia, 1998.

[5] Orlicky, J. ***Material Requirements Planning.*** McGraw-Hill, Nueva York, 1975.

[6] Silver, E. A., Pyke, D. F. y Peterson, R. ***Inventory Management and Production Planning and Control.*** 3a. ed. John Wiley & Sons, Nueva York, 1998.

[7] Veilleux, R. F. y Petro, L. W. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook*****,** 4a. ed. Vol. V, ***Manufacturing Management***, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1988.

[8] Vollman, T. E., Berry. W. E. y Whybark, D. C. ***Manufacturing Planning and Control Systems***, 4a. ed. McGraw-Hill, Nueva York, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

43.1. ¿Qué significa el término “producción hacer para almacenar”?

43.2. ¿En qué es diferente la planeación agregada del programa maestro de producción?

43.3. ¿Qué categorías de productos se enlistan en el programa maestro de producción?

43.4. ¿Cuál es la diferencia entre las demandas de productos dependientes e independientes?

43.5. Defina sistema de inventarios con punto de reorden.

43.6. En la MRP, ¿qué son los artículos de uso común?

43.7. Identifique cuáles son las entradas para un procesador MRP en la planeación de requerimientos de materiales.

43.8. ¿Cuáles son algunos de los cambios de recursos que pueden hacerse para aumentar la capacidad de una planta a corto plazo?

43.9. Identifique el objetivo principal en la producción justo a tiempo.

43.10. ¿Cuál es la diferencia entre un sistema continuo y un sistema de refuerzo de producción en el control de la producción y los inventarios?

43.11. ¿Cuáles son las tres fases en el control de piso del taller?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 15 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

43.1. ¿Cuál de los siguientes términos describe mejor el funcionamiento general de la planeación y el control de la producción?: *a*) control de inventario, *b*) logística de manufactura, *c*) ingeniería de manufactura, *d*) producción masiva o *e*) diseño de productos.

43.2. ¿Cuál de las siguientes categorías se enlista generalmente en el programa maestro de producción? (tres mejores respuestas): *a*) los componentes usados para construir los productos finales, *b*) las órdenes de clientes de la empresa, *c*) las líneas de productos generales, *d*) las órdenes de mantenimiento y piezas de repuesto, *e*) los pronósticos de ventas y *f*) los neumáticos de repuesto.

43.3. ¿Cuál de las siguientes opciones forma parte de los costos iniciales de inventario? (dos mejores respuestas): *a*) tiempo muerto del equipo, *b*) interés, *c*) producción, *d*) preparación, *e*) deterioro, *f*) existencias agotadas y *g*) almacenamiento?

43.4. ¿Cuáles de los siguientes son términos en la fórmula de cantidad económica de pedido? (tres respuestas correctas): *a*) razón de demanda anual, *b*) tamaño de lote, *c*) costo por pieza, *d*) costo de mantener inventarios, *e*) tasa de interés y *f*) costo de preparación.

43.5. ¿Para cuál de las siguientes opciones están planeados los sistemas de inventario con punto de orden? (dos mejores respuestas): *a*) artículos de demanda dependiente, *b*) artículos de demanda independiente, *c*) cantidades de producción bajas, *d*) cantidades de producción masiva y *e*) cantidades de producción de rango medio.

43.6. ¿Con cuál de los siguientes recursos de manufactura se relaciona principalmente la planeación de los requerimientos de capacidad? (dos mejores respuestas): *a*) piezas componentes, *b*) mano de obra directa, *c*) espacio de almacenamiento de inventario, *d*) equipo de producción y *e*) materias primas.

43.7. ¿Con cuál de los siguientes términos se asocia más estrechamente la palabra kanban? *a*) planeación de la capacidad, *b*) cantidad económica de pedido, *c*) producción justo a tiempo, *d*) programa maestro de producción, o *e*) planeación de requerimientos de materiales.

43.8. ¿Con cuál de las siguientes opciones se relaciona más estrechamente el término carga de las máquinas? *a*) asignación de trabajos a un centro de trabajo, *b*) establecimiento de secciones en la fábrica, *c*) administración del trabajo en proceso en la fábrica, *d*) liberación de pedidos para el taller o *e*) establecimiento de secuencias de trabajo a través de una máquina.

PROBLEMAS

Control de inventarios

43.1. Se hace un producto para acumular existencias. La demanda anual es de 86 000 unidades. Cada unidad cuesta $9.50 y la razón de costos por mantener un inventario anual es de 22%. El costo de preparación para producir el artículo es de $800. Determine *a*) la cantidad económica de pedido y *b*) los costos del inventario total para esta situación.

43.2. Si la demanda anual de un producto es 20 000 unidades; el costo por unidad es de $6.00, la razón de costo por mantener inventarios es de 2.5%/mes, el tiempo para cambios (preparación) entre promedios de productos es de 2.0 h, y el costo de tiempo muerto durante los cambios es de $200/h, determine *a*) la cantidad económica de pedido y *b*) los costos del inventario total para esta situación.

43.3. Un producto se fabrica por lotes. El tamaño del lote es de 2000 unidades. La demanda anual es de 50 000 unidades y el costo por unidad del producto es de $4.00. El tiempo de preparación para producir un lote es de 2.5 h, el costo de tiempo muerto en el equipo afectado se calcula en $250/h, y la razón anual de costo por mantener inventarios es de 30%. ¿Cuánto se ahorraría al año si el producto se produjera con la cantidad económica de pedido?

43.4. La producción de un artículo requiere que usted ordene una reserva de un subcomponente. La demanda del producto se mantiene estable a través del año en 7800 unidades anuales. El costo por hacer un pedido es de $95. El costo de un subcomponente es de $56 y la tasa del costo por mantener inventarios es de 22%. Cuando se ordenan unidades, tardan dos semanas en llegar. Determine *a*) la cantidad económica de pedido y *b*) el punto de reorden; *c*) Los componentes se preempacan en múltiplos de 100. El proveedor ahorra tiempo de desempaque y reempaque si los embarques se realizan en múltiplos de 100. El proveedor ha ofrecido reducir el precio en $1 por unidad si usted compra en múltiplos pares de 100. ¿Cuánto ahorraría (si existe algún ahorro) al tomar esta oferta?

43.5. Cierta pieza del equipo de producción se usa para fabricar diversos componentes destinados a un producto ensamblado de la compañía XYZ. Para conservar bajos los inventarios en proceso, se desea producir los componentes en lotes de 150 unidades (requerimientos diarios para el ensamble). La demanda de cada producto es de 2500 unidades por año. Los costos de tiempo muerto de la producción se estiman en $200/h. Todos los componentes que se hacen en el equipo tienen aproximadamente un valor unitario igual, el cual es de $9.00. La tasa de costo por mantener inventarios es de 30%/año. ¿En cuántos minutos debe terminarse el cambio (preparación) entre lotes para que la cantidad económica de pedido sea de 100 unidades?

43.6. El tiempo de cambio (preparación) actual en cierta máquina es de 3.0 h. El costo de tiempo muerto en esta máquina se estima en $200/hr. El costo anual por mantener inventarios de cada pieza hecha en el equipo, C_h es de $1.00. La demanda anual de esta pieza es de 15 000 unidades. Determine *a*) la *EOQ* y *b*) los costos del inventario total para estos datos. También determine *c*) la *EOQ* y *d*) los costos de inventario total si este tiempo de cambio se redujera a 6 minutos.

43.7. El enfoque de dos recipientes se usa para controlar el inventario de un componente particular de bajo costo. Cada recipiente contiene 1200 unidades. El uso anual del componente es de 45 000 unidades. El costo por ordenar el componente es de alrededor de $70. *a*) ¿Cuál es el costo implícito de mantener inventarios por unidad para estos datos? *b*) Si el costo de mantener un inventario anual real por unidad es de sólo siete centavos, ¿qué tamaño de lote debe solicitarse? *c*) ¿Cuál es el costo adicional del enfoque actual de dos recipientes que debe pagar anualmente la compañía, en comparación con la cantidad económica de pedido?

Planeación de requerimientos de materiales

43.8. Se van a planear los requerimientos de cantidades del componente C2 en el producto P1. Las entregas requeridas de P1 se proporcionan en la tabla 43.1. Los tiempos para terminar la orden, la manufactura y el ensamblado son: para P1 y C2, el tiempo de entrega es de una semana; y para S1 y M2, el tiempo de entrega es de dos semanas. Dada la estructura del producto en la figura 43.4, determine los requerimientos en fases de tiempo para M2, C2 y S1 con el propósito de cumplir el programa maestro de P1. Suponga que no hay artículos de uso común y que todos los inventarios de existencias y recepciones programadas son cero. Use un formato similar al de la figura 43.2. No tome en cuenta la demanda de P1 más allá del periodo 10.

43.9. Se van a planear los requerimientos del componente C5 en el producto P1. Las entregas requeridas para P1 se proporcionan en la tabla 43.1. Los tiempos para terminar la orden, la manufactura y el ensamblado son: para P1 y S2, el tiempo de entrega es una semana; para C5, el tiempo de entrega es de tres semanas; y para M5, el tiempo de entrega es de dos semanas. Dada la estructura del producto en la figura 43.4, determine los requerimientos en fase de tiempo para M5, C5 y S2 de cumplir el programa maestro para P1. Suponga que no hay artículos de uso común. Los inventarios en existencias son de 200 unidades para M5, 100 unidades para C5 y cero para S2. Use un formato similar al de la figura 43.2. No tome en cuenta la demanda de P1 más allá del periodo 10.

43.10. Resuelva el problema anterior, pero considere los siguientes datos adicionales a la información proporcionada: las entregas programadas de M5 son 250 unidades en el periodo (semana) tres y 50 unidades en el periodo (semana) 4.

Programación de pedidos

43.11. Se van a fabricar cuatro productos en el departamento A, y se pretende determinar la asignación de recursos en ese departamento con el fin de cumplir la demanda requerida de estos productos para una semana determinada. Para el producto 1, la demanda es de 750/semana, tiempo de preparación de 6 h, y tiempo de operación de 4.0 min. Para el producto 2, la demanda es de 900/semana, tiempo de preparación de 5 h, y tiempo de operación de 3.0 min. Para el producto 3, la demanda es de 400/semana, tiempo de preparación de 7 h, y tiempo de operación de 2.0 min. Para el producto 4, la demanda es de 400/semana, tiempo de preparación de 6 h, y tiempo de operación de 3.0 min. La planta normalmente opera un turno (7.0 h/turno), cinco días por semana, y actualmente hay tres centros de trabajo en el departamento. Proponga una forma de programar las máquinas para cumplir la demanda semanal.

43.12. En el problema anterior, proponga una forma de programar para cumplir la demanda semanal si hubiera cuatro centros de trabajo en lugar de tres.

43.13. La fecha actual en el calendario de producción de la compañía XYZ es el día 14. Se van a procesar tres pedidos (A, B y C), en un centro de trabajo particular. Las órdenes llegaron en la secuencia A, B, C, al centro de trabajo. Para la orden A, el tiempo de proceso restante es de ocho días, y la fecha de entrega es el día 24. Para la orden B, el tiempo de proceso restante es de 14 días, y la fecha de entrega es el día 33. Para la orden C, el tiempo de proceso restante es de seis días, y la fecha de entrega es el día 26. Determine la secuencia de las solicitudes que se programarían usando: *a*) primero en llegar, primero en atenderse, *b*) fecha de entrega más próxima, *c*) tiempo de procesamiento más breve, *d*) menor tiempo de inactividad y *e*) razón crítica.

43.14. Hay cinco trabajos esperando para ser programados en una máquina. Para la orden A, el tiempo de proceso restante es de cinco días, y la fecha de entrega es el día 8. Para la orden B, el tiempo de proceso restante es de siete días, y la fecha de entrega es el día 16. Para la orden C, el tiempo de proceso restante es de 11 días, y la fecha de entrega es el día 22. Para la orden D, el tiempo de proceso restante es de nueve días, y la fecha de entrega es el día 31. Para la orden E, el tiempo de proceso restante es de 10 días, y la fecha de entrega es el día 26. Determine un programa de producción con base en *a*) tiempo de procesamiento más breve, *b*) fecha de entrega más próxima, *c*) razón crítica, *d*) menor tiempo de inactividad. Todos los tiempos enlistados están en días.

44 CONTROL DE CALIDAD

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Tradicionalmente, el ***control de calidad*** (QC, por el inglés *quality control*) se relaciona con la detección de la calidad deficiente en los productos manufacturados y con tomar las acciones correctivas para eliminarlas. Operativamente, el QC con frecuencia se había limitado a inspeccionar el producto y sus componentes, y decidir si las dimensiones medidas o calibradas y otras características se apegaban a las especificaciones de diseño. Si cumplía esos parámetros, el producto se enviaba. La visión moderna del control de calidad abarca un ámbito de actividades más amplio, incluyendo el diseño robusto y el control estadístico de procesos. Este capítulo comienza con la definición de la calidad del producto.

44.1 ¿QUÉ ES LA CALIDAD?

El diccionario define calidad como “el grado de excelencia que posee una cosa” o “las características que hacen a algo lo que es”, sus elementos y atributos característicos. No coinciden todas las opiniones de los principales expertos. Crosby define calidad como “la conformidad con los requerimientos” [2]. Juran resume que es “la aptitud para el uso” y “la calidad es la satisfacción del cliente” [5]. La American Society for Quality (ASQ, por sus siglas en inglés) define la calidad como “la totalidad de características de un producto o servicio que sostienen su capacidad para satisfacer determinadas necesidades” [3].

TABLA 44.1 Aspectos de la calidad.

Aspectos de las características del producto	Aspectos de la carencia de deficiencias
Configuración de diseño, tamaño, peso	Ausencia de defectos
Características distintivas del modelo	Conformidad con las especificaciones
Facilidad de uso	Componentes dentro de la tolerancia
Atractivo estético	Sin piezas faltantes
Funcionamiento y rendimiento	Sin fallas iniciales
Disponibilidad de opciones	
Confiabilidad y capacidad de dependencia	
Durabilidad y larga vida de servicio	
Posibilidad de recibir servicio	
Reputación del producto y el fabricante	

Recopilado de [5] y otras fuentes.

En un producto manufacturado, la calidad tiene dos aspectos [5]: 1) las características del producto y 2) la carencia de deficiencias. Las ***características del producto*** son los aspectos del producto que provienen del diseño; son características funcionales y estéticas del artículo que pretenden atraer y aportar satisfacción al cliente. En un automóvil, estas características incluyen el tamaño de éste, la disposición de elementos en el tablero, el acabado de la carrocería y aspectos similares. También se cuentan las opciones disponibles entre las cuales elige el cliente. En la tabla 44.1 se enlistan algunas de las características importantes y generales de los productos. La suma de las características de un producto define su ***grado***, el cual se relaciona con el nivel de mercado al que se dirige el producto. Los automóviles (y casi todos los demás productos) vienen en diferentes grados. Algunos autos proporcionan transportación básica porque eso es lo que quieren algunos clientes, en tanto que otros están en una escala superior, para clientes dispuestos a gastar más por tener un “mejor producto”. Las características de un producto se deciden en el diseño y generalmente determinan el costo inherente del producto. Las características superiores y la cantidad de ellas significan un costo más alto.

Carencia de deficiencias significa que el producto hace lo que se supone debe hacer (dentro de las limitaciones de sus características de diseño) y que está exento de defectos y de condiciones fuera de lo tolerable (tabla 44.1). Este aspecto de la calidad incluye los componentes individuales del producto, así como el producto mismo. Cuando está libre de deficiencias significa que se apega a las especificaciones de diseño, lo cual se consigue en el procesamiento. Aunque el costo inherente de manufactura en un producto es una función de su diseño, minimizar el costo del producto al más bajo nivel posible dentro de los límites establecidos por su diseño es en gran parte una cuestión de evitar defectos, desviaciones de las tolerancias y otros errores durante la producción. De hecho, los costos de todas estas deficiencias forman una larga lista de piezas desechadas, tamaños de lotes más grandes para reponer los desechos, retrabajo, inspección, clasificación, quejas y devoluciones de los clientes, costos de garantía y rebajas a los clientes, ventas con pérdidas y reducción de la buena voluntad en el mercado.

Por lo tanto, las características de un producto son los aspectos de la calidad de los que se responsabiliza el departamento de diseño. Las características de los productos determinan en gran parte el precio que puede cobrar una compañía por sus productos. La carencia de deficiencias es el aspecto de la calidad por el cual se responsabilizan los departamentos de manufactura. La capacidad para minimizar estas deficiencias influye enormemente en el costo del producto. Estas generalidades simplifican bastante la forma en que funcionan las cosas, debido a que la responsabilidad de la alta calidad de un producto se extiende mucho más allá de las funciones de diseño y manufactura en una organización.

44.2 CAPACIDAD DEL PROCESO

En cualquier operación de manufactura existe variabilidad en el resultado del proceso. En una operación de maquinado, que es uno de los procesos más exactos, las piezas maquinadas pueden parecer idénticas, pero una inspección más cercana revela diferencias

de dimensiones de una pieza con la siguiente. Las variaciones en la manufactura se dividen en dos tipos: aleatorias y asignables.

Las ***variaciones aleatorias*** son causadas por muchos factores: la variabilidad humana con cada ciclo de operaciones, las variaciones en las materias primas, la vibración de las máquinas, etc. En forma individual, estos factores tal vez no representen mucho, pero colectivamente los errores pueden acumularse en forma significativa para provocar problemas, a menos que estén dentro de las tolerancias de la pieza. De manera típica, las variaciones aleatorias forman una distribución estadística normal. El resultado del proceso tiende a agruparse alrededor del valor de la media, en términos de la característica de calidad del producto de interés (por ejemplo, la longitud y el diámetro). Una gran proporción de la población de piezas se centra alrededor de la media, mientras que menos piezas se alejan de ella. Cuando las únicas variaciones en el proceso son de este tipo, se dice que el proceso está en ***control estadístico***. Este tipo de variabilidad continuará mientras el proceso opere en forma normal. Cuando el proceso se desvía de esta condición de operación normal aparecen las variaciones del segundo tipo.

Las ***variaciones asignables*** indican una excepción de las condiciones de operación normales. Ha ocurrido algo en el proceso que no está considerado dentro de las variaciones aleatorias. Entre las razones de las variaciones asignables están los errores de los operadores, las materias primas defectuosas, las fallas en las herramientas, los desperfectos de las máquinas, etcétera. Las variaciones asignables en la manufactura por lo general se delatan a sí mismas al causar que el resultado se desvíe de la distribución normal. El proceso ya no está en control estadístico.

La capacidad del proceso se relaciona con variaciones normales inherentes en el resultado cuando el proceso está en control estadístico. Por definición, la ***capacidad del proceso*** es igual a $\pm$ 3 desviaciones estándar alrededor del valor de la media del resultado (un total de seis desviaciones estándar):

$$PC = \mu \pm 3\sigma \tag{44.1}$$

en donde PC = capacidad del proceso; μ = media del proceso, que se establece como el valor nominal de la característica del producto cuando se usa una tolerancia bilateral (sección 5.1.1) y σ = desviación estándar del proceso. Los supuestos subyacentes en esta definición son: 1) el resultado se distribuye en forma normal y 2) se ha obtenido una operación estable y el proceso está en control estadístico. Bajo estos supuestos, el 99.73% de las piezas producidas tendrán valores en el resultado que caen dentro del $\pm 3.0\sigma$ desde la media.

44.3 TOLERANCIA ESTADÍSTICA

El aspecto de las tolerancias es vital para la calidad de los productos. Los ingenieros de diseño tienden a asignar tolerancias en las dimensiones de los componentes y ensambles; con base en sus conocimientos y experiencia, pueden predecir cómo afectarán las variaciones de tamaño el funcionamiento y el rendimiento. La experiencia indica que las tolerancias más estrechas provocan un mejor rendimiento. Se da poca importancia al costo provocado por las tolerancias que son indebidamente estrechas en relación con la capacidad del proceso. La relación general entre la tolerancia y el costo de manufactura se muestra en la figura 44.1. Conforme se reduce la tolerancia, el costo para alcanzar la tolerancia aumenta en forma acelerada. Esto es porque pueden requerirse pasos de procesamiento adicionales para obtener tolerancias más estrechas y pueden necesitarse máquinas de producción que sean más precisas y costosas.

El ingeniero de diseño debe considerar esta relación. Aunque al asignar tolerancias debe considerarse principalmente el funcionamiento, el costo también es un factor y cualquier liberación que pueda proporcionarse a los departamentos de manufactura en forma de tolerancias más amplias, sin sacrificar el funcionamiento del producto, resulta valiosa. Existen varios enfoques que consideran la capacidad del proceso al especificar tolerancias. Aquí se examinan dos: 1) límites naturales de tolerancia y 2) tolerancia estadística para

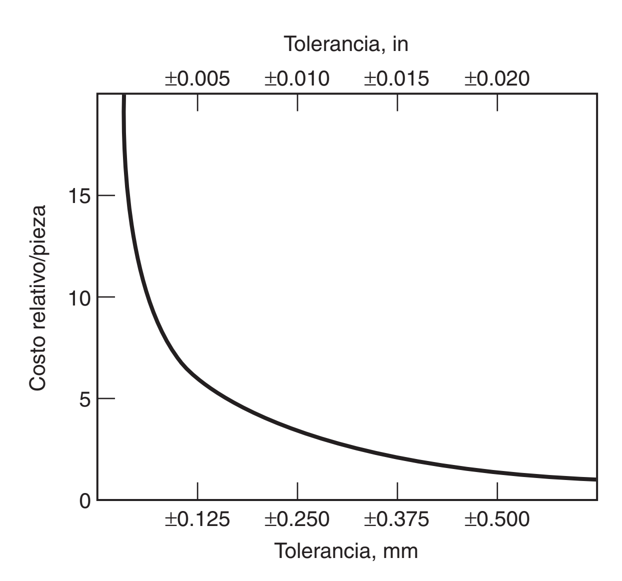


FIGURA 44.1 Relación general entre las tolerancias y el costo de manufactura.

ensamble. En las referencias [5], [9] y [10] pueden encontrarse más detalles acerca de estos y otros enfoques.

44.3.1 Límites naturales de tolerancia

Las tolerancias de diseño deben ser compatibles con la capacidad del proceso. No hay razón para especificar una tolerancia de ±0.025 mm (±0.001 in) en una dimensión si la capacidad del proceso es significativamente más amplia que ± 0.025 mm (±0.001 in). Debe ampliarse la tolerancia (si la funcionalidad del diseño lo permite) o debe seleccionarse una operación de manufactura distinta. Lo ideal es que la tolerancia especificada debe ser más grande que la capacidad del proceso. Si el funcionamiento y los procesos disponibles lo impiden, debe incluirse la clasificación en la secuencia de manufactura para inspeccionar cada unidad y separar las que cumplen especificaciones de las que no lo hacen.

Las tolerancias de diseño se especifican como iguales a la capacidad de proceso, la cual se define en la ecuación (44.1). Los límites superior e inferior de este rango se conocen como ***límites naturales de tolerancia***. Cuando las tolerancias de diseño se establecen como iguales a los límites naturales de tolerancia, el 99.73% de las piezas estarán dentro de la tolerancia y el 0.27% estará fuera de los límites. Cualquier aumento en el rango de la tolerancia reducirá el porcentaje de piezas defectuosas.

Por lo general, los ingenieros de diseño de productos no establecen las tolerancias en sus límites naturales; éstas se especifican con base en la variabilidad disponible que obtendrá el funcionamiento y el rendimiento requerido. Resulta útil conocer la razón de la tolerancia especificada en relación con la capacidad del proceso. Esto se indica mediante el ***índice de capacidad del proceso***

$$PCI = \frac{T}{6\sigma} \tag{44.2}$$

donde PCI = índice de capacidad del proceso; T = rango de tolerancia, la diferencia entre los límites superior e inferior de la tolerancia especificada; y 6σ = límites naturales de tolerancia. El supuesto subyacente en esta definición es que la media del proceso se establece igual a la especificación nominal de diseño, por lo que el numerador y el denominador en la ecuación (44.2) se centra alrededor del mismo valor.

La tabla 44.2 muestra el efecto de varios múltiplos de la desviación estándar sobre la tasa de defectos (esto es, la proporción de piezas fuera de la tolerancia). El deseo de obtener una tasa fraccional muy baja ha llevado a la noción popular de los límites de "seis sigma" en el control de calidad (última entrada en la tabla). Cuando se obtienen límites de seis sigma virtualmente se eliminan los defectos en un producto manufacturado, suponiendo que el proceso se mantiene dentro de control estadístico.

TABLA 44.2 Tasa de defectos cuando la tolerancia se define en términos del número de desviaciones estándar del proceso, dado que el proceso opera en control estadístico.

Número de desviaciones estándar	Índice de capacidad del proceso	Tasa de defectos %	Partes por millón
±1.0	0.333	31.74%	317,400
±2.0	0.667	4.56%	45,600
±3.0	1.00	0.27%	2,700
±4.0	1.333	0.0063%	63
±5.0	1.667	0.000057%	0.57
±6.0	2.00	0.0000002	0.002

No siempre se conoce la capacidad de proceso de una operación de manufactura determinada y deben realizarse experimentos para valorarla. Existen métodos disponibles para estimar los límites naturales de tolerancia, los cuales se basan en un muestreo del proceso.

44.3.2 Tolerancias estadísticas para ensambles

En la figura 44.2 se muestra un ensamble que consiste en tres componentes, en el cual la longitud general debe mantenerse a una tolerancia de ±0.30 mm (±0.012 in). Para obtener la tolerancia en el ensamble, ¿cuáles deben ser los límites de tolerancia de los componentes individuales? La respuesta simple es dividir la tolerancia total entre el número de componentes, para que la suma de sus tolerancias individuales sea igual a la tolerancia del ensamble. Si la tolerancia del ensamble se distribuye equitativamente entre las piezas, la tolerancia de cada una de las tres piezas es ±0.10 mm (±0.004 in). Esto significa que si todas las piezas están dentro de la tolerancia, ninguna combinación de sus dimensiones producirá una dimensión de ensamble que esté fuera de ella. Este enfoque para establecer la tolerancia se denomina adecuadamente ***diseño en el peor de los casos***.

Si se supone que los procesos de manufactura de los componentes están en control estadístico y si existe disposición a aceptar una tasa de defectos en fracciones pequeñas en la dimensión general del ensamble, las tolerancias de los componentes individuales pueden hacerse mucho más amplias que bajo la filosofía de diseño del peor de los casos. Puede usarse un enfoque estadístico para establecer tolerancias para ensambles (y otras dimensiones aditivas), el cual se basa en la siguiente relación entre la desviación estándar de la dimensión del ensamble y las desviaciones estándar de las dimensiones de los componentes:

$$\sigma_a^2 \sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 \tag{44.3}$$

donde n = número de componentes.

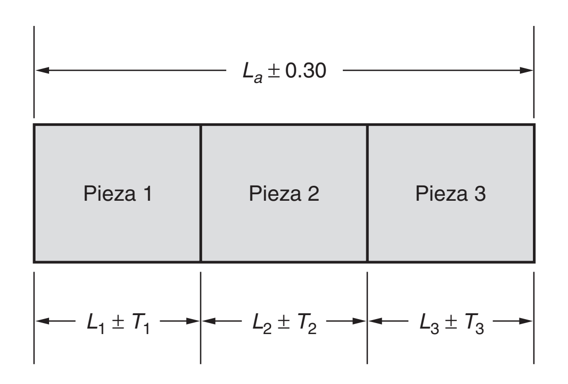


FIGURA 44.2 Un ensamble que consiste en tres piezas, cuya dimensión general (L_a) tiene una tolerancia de ±0.30 mm (±0.012 in).

Si las tolerancias en los componentes individuales se establecen en determinado múltiplo de sus desviaciones estándar respectivas (por ejemplo, los límites naturales de tolerancia, donde $T = 6\sigma$) y es conveniente establecer la tolerancia en el ensamble usando el mismo múltiplo, entonces

$$T_a = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} T_i^2} \tag{44.4}$$

en donde T_a = tolerancia de la dimensión del ensamble; T_i = tolerancias de las dimensiones de los componentes individuales y n = número de componentes. La acumulación de las tolerancias cuadradas individuales en la ecuación (44.4) es válida si las dimensiones de los componentes se agregan o restan para obtener la dimensión general del ensamble.

Las ecuaciones de tolerancia estadística bajo esta forma se basan en varios supuestos: 1) las dimensiones de los componentes se distribuyen en forma normal, 2) las distribuciones son independientes, 3) las piezas que forman un ensamble determinado se seleccionan en forma aleatoria y 4) los procesos para hacer los componentes están en control estadístico, con las medias de los procesos centradas en el rango de tolerancia. Si no se consideran estos supuestos en la manufactura, se producirá un nivel más alto de ensambles fuera de tolerancia que el indicado por los valores en la tabla 44.2.

EJEMPLO 44.1 Tolerancia estadística

Suponga que un ensamble consiste en tres componentes, como en la figura 44.2. La dimensión general del ensamble es = 75.0 ± 0.30 mm y cada pieza tiene una dimensión de 25.0 mm. Si todas las tolerancias de los componentes son iguales, calcule la tolerancia de componentes usando la tolerancia estadística.

Solución: En este problema, se resuelve la ecuación (44.4) para la tolerancia de componentes, donde la cantidad de piezas $n = 3$ y todas las T_i son iguales.

$$T_a = 0.30 = \sqrt{3T_i^2}$$
$$3T_i^2 = (0.30)^2 = 0.09$$
$$T_i^2 = \frac{0.09}{3} = 0.03$$
$$T_i = \sqrt{0.03} = 0.173 \text{ mm}$$

La tolerancia en los componentes individuales usando tolerancia estadística es de ± 0.173 mm. Esto se compara con el valor ± 0.100 mm bajo el enfoque de tolerancia en el peor de los casos. ■

44.4 MÉTODOS DE TAGUCHI

Taguchi ha tenido una influencia importante en el desarrollo de la ingeniería de calidad, tanto en el diseño de productos como en el de procesos. En esta sección se revisarán algunos de los métodos de Taguchi. Bajo el riesgo de simplificar en exceso sus contribuciones, se distribuyen en tres temas: 1) función de pérdida, 2) diseño robusto y 3) control de calidad fuera de línea y en línea. Estos temas se analizan brevemente en las siguientes secciones. En las referencias [6] y [9] se puede encontrar una cobertura más completa.

44.4.1 La función de pérdida

Taguchi define la calidad como “la pérdida que paga la sociedad por un producto desde el momento en que éste se libera para su embarque” [9]. La pérdida incluye costos de operación, las fallas en el funcionamiento, los costos de mantenimiento y reparación, la

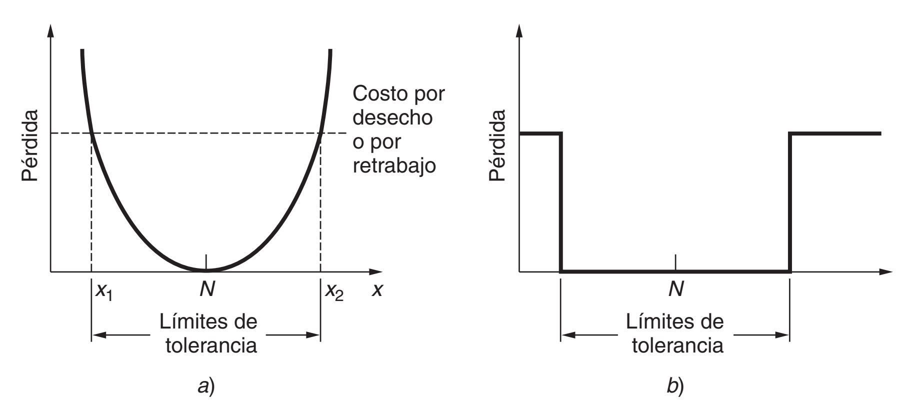


FIGURA 44.3 *a*) La función cuadrática de pérdida de la calidad. *b*) Función de pérdida implícita en una especificación tradicional de tolerancia.

insatisfacción de los clientes, las lesiones provocadas por un diseño deficiente y los costos similares. Algunas de estas pérdidas son difíciles de cuantificar en términos monetarios, pero no obstante son reales. Los productos defectuosos (o sus componentes) que se detectan antes del embarque no se consideran parte de esta pérdida. En lugar de eso, cualquier gasto para la compañía producido por el desecho o retrabajo de un producto defectuoso es un costo de manufactura y no una pérdida de calidad.

Ocurre una pérdida cuando una característica funcional de un producto difiere de su valor nominal o valor objetivo. Aunque las características funcionales no se traducen directamente en características de dimensiones, la relación de pérdida se comprende con mayor facilidad en términos de dimensiones. Cuando la dimensión de un componente se desvía de su valor nominal, el funcionamiento del componente se ve afectado en forma adversa. Sin importar qué tan pequeña sea la desviación, hay alguna pérdida en el funcionamiento. De acuerdo con Taguchi, la pérdida aumenta a una velocidad acelerada conforme crece la desviación. Si se supone que x = la característica de calidad que interesa, y N = su valor nominal, entonces la función de pérdida será una curva en forma de U como en la figura 44.3*a*). Para describir esta curva se usa una ecuación cuadrática:

$$L(x) = k(x - N)^2 \tag{44.5}$$

donde $L(x)$ = función de pérdida, k = constante de proporcionalidad, x y N se definieron con anterioridad. En algún nivel de desviación $(x_2 - N) = -(x_1 - N)$, la pérdida será prohibitiva y es necesario desechar o retrabajar el producto. Este nivel identifica una forma posible para especificar el límite de tolerancia de la dimensión.

En el enfoque tradicional del control de calidad se definen los límites de tolerancia y cualquier producto que cae dentro de esos límites es aceptable. La característica de calidad (por ejemplo, la dimensión) es aceptable, ya sea porque está cerca de un valor nominal o de uno de los límites de la tolerancia. Cuando se trata de visualizar este enfoque en términos similares a la relación anterior, se obtiene la función discontinua de pérdida que se muestra de la figura 44.3*b*). La realidad es que los productos más cercanos a la especificación nominal tienen una mejor calidad y aportarán una mayor satisfacción a los clientes. Para mejorar la calidad y la satisfacción del cliente se debe intentar reducir la pérdida diseñando el producto y el proceso lo más cerca posible del valor objetivo.

44.4.2 Diseño robusto

Un propósito fundamental del control de calidad es minimizar las variaciones. Taguchi denomina a las variaciones como factores de ruido. Un ***factor de ruido*** es una fuente de variaciones que es imposible o difícil de controlar y que afecta las características funcionales del producto. Pueden distinguirse tres tipos de factores de ruido: 1) unidad a unidad, 2) internos y 3) externos.

Los ***factores de ruido de unidad a unidad*** consisten en variaciones aleatorias inherentes al proceso o al producto, provocadas por la variabilidad en materias primas, maquinaria y participación humana. Éstos son factores de ruido que ya se han llamado previamente

variaciones aleatorias en el proceso. Se asocian con un proceso de producción que está en control estadístico.

Los ***factores de ruido internos*** son fuentes de variaciones internas en el producto o proceso. Incluyen factores que dependen del tiempo, como el desgaste de los componentes mecánicos, el desperdicio de las materias primas y la fatiga de las piezas metálicas; y los errores operativos, como las especificaciones incorrectas del producto o la máquina herramienta. Un ***factor de ruido externo*** es una fuente de variación que es ajena al producto o proceso, como la temperatura externa, la humedad, el abastecimiento de materia prima y el voltaje de entrada. Los factores de ruido internos y externos constituyen lo que antes se ha denominado variaciones asignables.

En el ***diseño robusto,*** el funcionamiento y rendimiento del producto son relativamente insensibles a las variaciones del diseño y los parámetros de manufactura. Involucra tanto el diseño del producto como el diseño del proceso para que el producto manufacturado casi no resulte afectado por todos los factores de ruido.

44.4.3 Control de calidad fuera de línea y en línea

Taguchi divide el sistema general de calidad en una organización en dos funciones básicas: el control de calidad fuera de línea y el control de calidad en línea. El ***control de calidad fuera de línea*** se relaciona con los aspectos de diseño, tanto de productos como de procesos. En la secuencia de las dos funciones, precede al control en línea. El ***control de calidad en línea*** se refiere a las operaciones y relaciones con los clientes después del embarque. Su objetivo es fabricar productos dentro de las especificaciones definidas en el diseño del producto, utilizando los métodos y procedimientos efectuados en tal proceso. Los métodos tradicionales de QC se alinean más estrechamente con esta segunda función, que trata de apegarse a la especificación.

Control de calidad fuera de línea El control de calidad fuera de línea consiste en dos etapas: diseño del producto y diseño del proceso. La etapa de ***diseño del producto*** implica la creación de un producto nuevo o un nuevo modelo de un producto existente. Las metas en el diseño del producto son identificar adecuadamente las necesidades de los clientes y diseñar un producto que cubra tales necesidades y se fabrique en forma consistente y económica. La etapa de ***diseño del proceso*** es lo que generalmente se considera como la función de ingeniería de manufactura. Se relaciona con la especificación de los procesos y el equipo, el establecimiento de los estándares de trabajo, la documentación de los procedimientos y la implantación de especificaciones claras y manejables para la manufactura.

A continuación se esquematiza un enfoque de tres pasos que puede aplicarse a estas dos etapas de diseño: 1) diseño del sistema, 2) diseño de parámetros y 3) diseño de tolerancias. El ***diseño del sistema*** involucra la aplicación de conocimientos y análisis de ingeniería para generar un diseño prototipo que cumpla con las necesidades de los clientes. En esta etapa, el diseño del producto significa la configuración final del producto, incluyendo los materiales iniciales, los componentes y los subensambles. En el diseño del proceso, el diseño del sistema significa seleccionar los métodos de manufactura más adecuados, con énfasis en el uso de las tecnologías existentes en lugar de crear nuevas. Resulta obvio que las etapas de diseño del producto y del proceso se traslapan, debido a que el diseño de producto determina en gran parte el diseño de manufactura. Asimismo, la calidad del producto se ve significativamente afectada cuando se toman malas decisiones durante el diseño del producto.

El ***diseño de parámetros*** se relaciona con la determinación de las especificaciones óptimas de parámetros para el producto y el proceso. En esta etapa se obtiene un diseño robusto, según se definió con anterioridad. Esto significa seleccionar valores de parámetros de producto que resulten en un producto que no se vea afectado por las variaciones en estos parámetros. También significa elegir valores de parámetro que minimicen los efectos de las variaciones del proceso. Taguchi sugiere el uso de varios diseños experimentales para determinar estas especificaciones óptimas de parámetros.

En el ***diseño de tolerancias***, el objetivo es especificar las tolerancias adecuadas para los valores nominales establecidos en el diseño de parámetros. Intenta obtener un balance

entre especificar tolerancias amplias que faciliten la manufactura y reducir las tolerancias para optimizar el funcionamiento de los productos.

Control de calidad en línea Esta función del control de calidad se relaciona con las operaciones de producción y las relaciones con los clientes. En la ***producción***, Taguchi clasifica tres enfoques para el control de calidad:

1. ***Diagnóstico y ajuste del proceso***. El proceso se mide en forma periódica y se hacen ajustes para desplazar los parámetros de interés hacia valores nominales.
2. ***Predicción y corrección del proceso***. Se miden los parámetros del proceso a intervalos periódicos de manera que puedan proyectarse las tendencias. Si las proyecciones indican desviaciones de los valores que se pretenden, se hacen ajustes correctivos del proceso.
3. ***Medición y acción del proceso***. Esto implica la inspección de todas las unidades (100%) para detectar deficiencias que tendrán que retrabajarse o descartarse. Como este enfoque ocurre cuando la unidad ya está hecha, es menos deseable que las otras dos formas de control.

El enfoque de control de calidad en línea de Taguchi incluye las ***relaciones con los clientes***, que constan en dos elementos. Primero, existe el servicio al cliente tradicional, que maneja las reparaciones, las sustituciones y las quejas. Segundo, incluye un sistema de retroalimentación, en el cual se comunica la información de fallas, quejas y datos relacionados con los departamentos relevantes en la organización, para su corrección. Este último esquema es parte del proceso de mejora continua que sugiere Taguchi.

44.5 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

El ***control estadístico de procesos*** (SPC, por sus siglas en inglés) implica el uso de métodos estadísticos para valorar y analizar las variaciones en un proceso. Los métodos del SPC incluyen simplemente mantener registros de los datos de la producción, histogramas, análisis de capacidad del proceso y gráficas de control. Estas últimas constituyen el método SPC de mayor uso y la presente sección se enfocará en ellas.

El principio subyacente en las gráficas de control es que las variaciones en cualquier proceso se dividen en dos tipos (sección 44.2): 1) variaciones aleatorias, que son las únicas presentes si el proceso está en control estadístico y 2) variaciones asignables, que indican una salida del control estadístico. El objetivo de una gráfica de control es identificar cuándo el proceso ha salido de control estadístico, señalando así que debe tomarse alguna acción correctiva.

Una ***gráfica de control*** es una técnica gráfica en la cual se trazan estadísticas calculadas a partir de valores medidos de ciertas características del proceso durante un periodo, a fin de determinar si el proceso sigue bajo control estadístico. La forma general de una gráfica de control se ilustra en la figura 44.4. La gráfica consiste en tres líneas horizontales que permanecen constantes con el tiempo: una central, un límite de control inferior (LCL, por sus siglas en inglés) y un límite de control superior (UCL, por sus siglas en inglés). La línea central generalmente se establece en el valor nominal de diseño. Los límites de control superior e inferior se establecen en ± 3 desviaciones estándar de las medias de muestra.

Es poco probable que una muestra obtenida del proceso se encuentre fuera de los límites de control superior o inferior, mientras las operaciones están en control estadístico. Por lo tanto, si un valor de muestra cae fuera de estos límites, se interpreta que el proceso está fuera de control. Por consiguiente se realiza una investigación para determinar la razón de la condición fuera de control, con acciones correctivas convenientes para eliminar tal condición. Por las mismas razones, si el proceso se encuentra en control estadístico y no hay evidencias de tendencias no deseadas en los datos, no deben hacerse ajustes, puesto

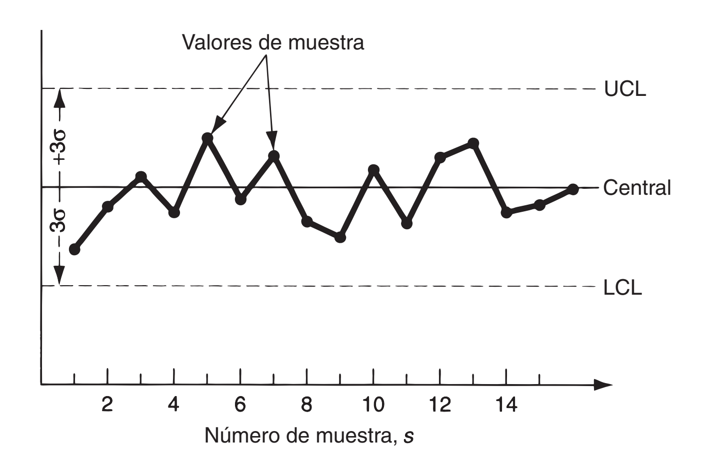


FIGURA 44.4 Gráfica de control.

que introducirían una variación asignable en el proceso. En las gráficas de control, es aplicable la filosofía de “si no se rompe, no lo arregles”.

Existen dos tipos básicos de diagramas de control: 1) gráficas de control por variables y 2) gráficas de control por atributos. Las gráficas de control por variables requieren una medición de la característica de calidad que interesa. Las gráficas de control por atributos simplemente requieren la determinación de si una pieza es defectuosa o cuántos defectos hay en la muestra.

44.5.1 Gráficas de control por variables

Un proceso que está fuera de control estadístico manifiesta esta condición en forma de cambios significativos en la media del proceso y/o la variabilidad del proceso. En correspondencia con estas posibilidades, existen dos tipos de gráficas de control por variables: la gráfica $\bar{x}$ y la gráfica R. La ***gráfica*** $\bar{x}$ (llamada “gráfica x barra”) se usa para trazar el valor medido promedio de cierta característica de calidad para cada una de una serie de muestras tomadas del proceso de producción. Indica cómo cambia la media del proceso durante un periodo. En la ***gráfica R*** se traza el rango de cada muestra, con lo que vigila la variabilidad del proceso e indica si cambia a través del tiempo.

Debe seleccionarse una característica de calidad conveniente del proceso como la variable que se va a vigilar en las gráficas $\bar{x}$ y R. En un proceso mecánico, esto podría ser el diámetro de una flecha o alguna otra dimensión importante. Deben usarse mediciones del proceso mismo para construir las dos gráficas de control.

Con el proceso funcionando en forma regular y sin variaciones asignables, se recopila una serie de muestras (por lo general, se recomienda $m = 20$ o más) de tamaño pequeño ($n = 4, 5$ o 6 piezas por muestra) y se miden las características que interesan de cada pieza. Se usa el procedimiento siguiente para construir la línea central, el LCL y el UCL para cada gráfica:

1. Calcule la media $\bar{x}$ y el rango R para cada una de las m muestras.
2. Calcule la media total $\bar{\bar{x}}$, que es la media de los valores de $\bar{x}$ para las m muestras; ésta será la línea central de la gráfica $\bar{x}$.
3. Calcule $\bar{R}$, que es la media de los valores de R para las m muestras; ésta será la línea central de la gráfica R.
4. Determine los límites de control superior e inferior, UCL y LCL, para las gráficas $\bar{x}$ y R. Los valores de la desviación estándar podrían estimarse a partir de los datos de muestra y usarse para calcular estos límites de control. Sin embargo, un enfoque más fácil se basa en los factores estadísticos incluidos en la tabla 44.3, que se han derivado

TABLA 44.3 Constantes para las gráficas $\bar{x}$ y R.

Tamaño de muestra n	Gráfica $\bar{x}$ A_2	Gráfica R D_3	D_4
3	1.023	0	2.574
4	0.729	0	2.282
5	0.577	0	2.114
6	0.483	0	2.004
7	0.419	0.076	1.924
8	0.373	0.136	1.864
9	0.337	0.184	1.816
10	0.308	0.223	1.777

específicamente para estas gráficas de control. Los valores de los factores dependen del tamaño de la muestra n. Para la gráfica $\bar{x}$:

$$\text{LCL} = \bar{x} - A_2\bar{R} \quad \text{y} \quad \text{UCL} = \bar{x} + A_2\bar{R} \tag{44.6}$$

y para la gráfica R

$$\text{LCL} = D_3\bar{R} \quad \text{y} \quad \text{UCL} = D_4\bar{R} \tag{44.7}$$

EJEMPLO 44.2 Gráficas $\bar{x}$ y R

Se recopilaron ocho muestras ($m = 8$) de tamaño 4 ($n = 4$), de un proceso de manufactura que está en control estadístico y se midió la dimensión de interés en cada pieza. Se pretende determinar los valores de la línea central, del LCL y del UCL para construir las gráficas $\bar{x}$ y R. Los valores calculados $\bar{x}$ y R para cada muestra se presentan a continuación (los valores medidos están en cm), éste es el paso 1 del procedimiento.

S	1	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{x}$	2.008	1.998	1.993	2.002	2.001	1.995	2.004	1.999
R	0.027	0.011	0.017	0.009	0.014	0.020	0.024	0.018

Solución: En el paso 2 se calcula la media total de los promedios de las muestras.

$$\bar{x} = (2.008 + 1.998 + \cdots + 1.999)/8 = 2.000$$

En el paso 3 se calcula el valor medio de R.

$$\bar{R} = (0.027 + 0.011 + \cdots + 0.018)/8 = 0.0175$$

En el paso 4, se determinan los valores del LCL y del UCL con base en los factores de la tabla 44.3. Primero, usando la ecuación (44.6) para la gráfica $\bar{x}$,

$$\text{LCL} = 2.000 - 0.729(0.0175) = 1.9872$$
$$\text{UCL} = 2.000 + 0.729(0.0175) = 2.0128$$

y para la gráfica R se utiliza la ecuación (44.7),

$$\text{LCL} = 0(0.0175) = 0$$
$$\text{UCL} = 2.282(0.0175) = 0.0399$$

Las dos gráficas de control se construyen en la figura 44.5 con los datos de muestra dados en las gráficas.

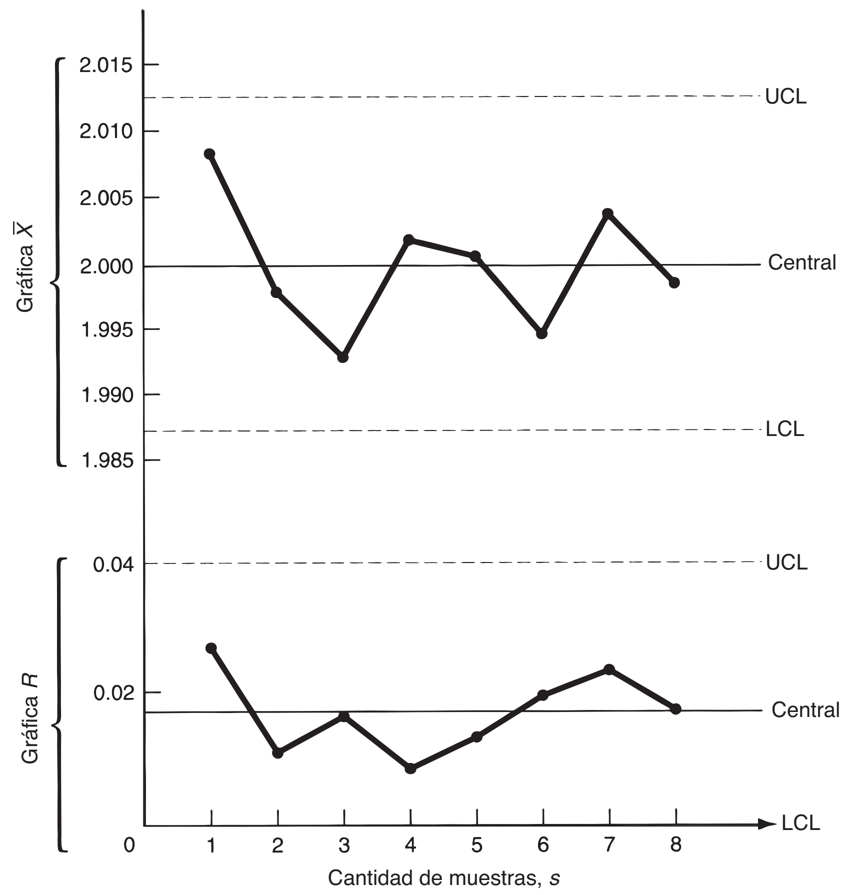


FIGURA 44.5 Gráficas de control para el ejemplo 44.2.

Si se conocen la media y la desviación estándar del proceso, una forma alternativa de calcular los límites de control superior e inferior y la línea central para la gráfica $\bar{x}$ será la siguiente:

$$\text{LCL} = \mu - \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{y} \quad \text{UCL} = \mu + \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} \tag{44.8}$$

donde μ = media del proceso; σ = desviación estándar del proceso y n = tamaño de la muestra. Los valores del LCL y del UCL que proporcionan las ecuaciones (44.8) en teoría son iguales a los calculados mediante las ecuaciones (44.6). Sin embargo, la primera vez que se establece la gráfica $\bar{x}$ para un proceso, por lo general no se conocen la media y la desviación estándar para la variable del proceso que interesa. De acuerdo con esto, las ecuaciones (44.6) basadas en los valores medidos de $\bar{x}$ y $\bar{R}$ pueden usarse convenientemente para calcular los parámetros de control de la gráfica. Con los límites de control establecidos en los valores definidos mediante las ecuaciones (44.6), o (44.8), 99.73% de las muestras aleatorias obtenidas en un proceso que está en control estadístico se encuentran dentro de los límites de control.

Los lectores observarán que la desviación estándar de las medias de la muestra se relaciona con la desviación de la población estándar mediante el recíproco de la raíz cuadrada de n, el número de unidades en la muestra:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{44.9}$$

en donde $\sigma_{\bar{x}}$ = desviación estándar de la media de la muestra; y los otros términos ya se definieron con anterioridad.

44.5.2 Gráficas de control por atributos

Las gráficas de control por atributos no usan una variable de calidad medida: en lugar de eso, monitorean el número de defectos presentes en la muestra o la tasa fraccionaria de defectos de acuerdo con el estadístico graficado. Entre los ejemplos de estos tipos de atributos se encuentran las cantidades de defectos por automóvil, la fracción de piezas dañadas en una muestra, la existencia o ausencia de rebabas en un moldeado plástico y el número de defectos en un rodillo de acero laminado. Los dos tipos principales de gráficas de control por atributos son la ***gráfica p***, que despliega la razón fraccional de defectos en muestras sucesivas y la ***gráfica c***, que despliega el número de defectos, fallas u otras variaciones por muestra.

Gráfica p En la gráfica p, la característica de calidad que interesa es la proporción (p) de unidades que no se ajustan al diseño o son defectuosas. Por cada muestra, esta proporción p_i es la razón de la cantidad de artículos d_i defectuosos o que no se ajustan al diseño sobre la cantidad de unidades en la muestra n (se suponen muestras de tamaño igual para construir y usar la gráfica de control):

$$p_i = \frac{d_i}{n} \tag{44.10}$$

donde i se usa para identificar la muestra. Si se promedian los valores p_i para un número suficiente de muestras, el valor medio $\overline{p}$ es una estimación razonable del valor verdadero de p para el proceso. La gráfica p se basa en una distribución binomial, donde p es la probabilidad de una unidad que no se ajusta al diseño. La línea central de la gráfica p es el valor calculado de $\overline{p}$ para m muestras de igual tamaño n, recopiladas mientras el proceso opera en control estadístico.

$$\overline{p} = \frac{\sum_{i=1}^{m} p_i}{m} \tag{44.11}$$

Los límites de control se calculan como tres desviaciones estándar en cualquier lado de la línea central. Por lo tanto,

$$\text{LCL} = \overline{p} - 3\sqrt{\frac{\overline{p}(1-\overline{p})}{n}} \quad \text{y} \quad \text{UCL} = \overline{p} + 3\sqrt{\frac{\overline{p}(1-\overline{p})}{n}} \tag{44.12}$$

donde la desviación estándar de $\overline{p}$ en la distribución binomial está dada por

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\overline{p}(1-\overline{p})}{n}}$$

Si el valor de $\overline{p}$ es relativamente bajo y el tamaño de la muestra n es pequeño, es probable que el límite inferior de control, calculado mediante la primera de estas ecuaciones, sea un valor negativo. En este caso, sea LCL = 0 (la razón fraccional de defectos no puede ser menor que 0).

Gráfica c En la gráfica c (c proviene de “cuenta”), el número de defectos en la muestra se grafica contra el tiempo. La muestra puede ser un solo producto como un automóvil y c = número de defectos de calidad encontrados durante la inspección final. La muestra puede ser también una extensión de alfombras en cierta fábrica antes del corte y c = número de imperfecciones descubiertas en tal tira. La gráfica c se basa en la distribución Poisson, donde c = parámetro que representa la cantidad de eventos que ocurren dentro de un espacio de muestra definido (defectos por automóvil o imperfecciones por longitud especificada de alfombra). El mejor estimado del valor verdadero de c es el valor de la media sobre un gran número de muestras obtenidas mientras el proceso está en control estadístico:

$$\overline{c} = \frac{\sum_{i=1}^{m} c_i}{m} \tag{44.13}$$

Este valor de $\bar{c}$ se usa como la línea central de la gráfica de control. En la distribución Poisson la desviación estándar es la raíz cuadrada del parámetro *c*. Por lo tanto, los límites de control son:

$$LCL = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}} \quad \text{y} \quad UCL = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}} \tag{44.14}$$

44.5.3 Interpretación de las gráficas

Cuando se usan gráficas de control para monitorear la calidad de la producción, se obtienen muestras aleatorias del proceso del mismo tamaño *n* usado para construir las gráficas. En las gráficas $\bar{x}$ y *R*, se trazan los valores $\bar{x}$ y *R* de las características medidas en la carta de control. Por convención, los puntos generalmente están conectados como en las figuras presentadas aquí. Para interpretar los datos, se buscan signos que indiquen que el proceso no está en control estadístico. El signo más obvio es cuando $\bar{x}$ o *R* (o ambos) se encuentran fuera de los límites LCL o UCL. Esto indica una causa asignable, como materiales iniciales defectuosos, un operador nuevo, una herramienta descompuesta o factores similares. Una $\bar{x}$ fuera del límite indica un cambio en la media del proceso. Una *R* fuera de límite muestra que ha cambiado la variabilidad del proceso. El efecto usual es que *R* aumenta, indicando que se ha elevado la variabilidad. Se pueden revelar condiciones menos obvias, aun cuando los puntos de muestra se encuentren dentro de los límites $\pm 3\sigma$. Entre estas condiciones están: 1) existen tendencias o patrones cíclicos en los datos, lo cual puede significar desgaste u otros factores que ocurren en función del tiempo; 2) cambios súbitos en el nivel promedio de los datos; y 3) puntos consistentemente cerca de los límites superior o inferior.

Los mismos tipos de interpretaciones que se aplican a las gráficas $\bar{x}$ y *R* también son aplicables para las gráficas *p* y c.

REFERENCIAS

[1] Box, G. E. P. y Draper, N. R. ***Evolutionary Operation: A Statistical Method for Process Improvement.*** John Wiley & Sons., Inc., Nueva York, 1998.

[2] Crosby, P. B. ***Quality Is Still Free***. McGraw-Hill, Nueva York, 1999.

[3] Evans, J. R. y Lindsay, W. M. ***The Management and Control of Quality,*** 6a. ed. Thomson/South Western College Publishing Company, Mason, Ohio, 2005.

[4] Groover, M. P. ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing,*** 2a. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. 2001.

[5] Juran, J. M. y Gryna, F. M. ***Quality Planning and Analysis,*** 3a. ed. McGraw-Hill, Nueva York, 1993.

[6] Lochner. R. H. y Matar, J. E. ***Designing for Quality***. ASQC Quality Press, Milwaukee, Wis., 1990.

[7] Montgomery, D. C. ***Introduction to Statistical Quality Control***, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N.J., 2005.

[8] Pyzdek, T. ***Quality Engineering Handbook***. Marcel Dekker, Nueva York, 1999.

[9] Taguchi, G., Elsayed, E. A. y Hsiang, T. C. ***Quality Engineering in Production Systems***. McGraw-Hill, Nueva York, 1989.

[10] Wick, C. y Veilleux, R. F. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. IV, ***Quality Control and Assembly***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1987.

PREGUNTAS DE REPASO

44.1. ¿Cuáles son los dos aspectos principales en la calidad del producto?

44.2. ¿Cómo se distingue a un proceso que opera en control estadístico de uno que no funciona de esa forma?

44.3. Defina capacidad de proceso.

44.4. ¿Qué son los límites naturales de tolerancia?

44.5. ¿Qué significa diseño robusto, según lo define Taguchi?

44.6. ¿Cuál es la diferencia entre las gráficas de control por variables y las gráficas de control por atributos?

44.7. Identifique los dos tipos de gráficas de control por variables.

44.8. ¿Cuáles son los dos tipos básicos de gráficas de control por atributos?

44.9. Cuando se interpreta una gráfica de control ¿Qué es lo que se busca para identificar problemas?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 12 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

44.1. ¿Cuál de los siguientes ejemplos se clasificaría como una característica del producto y no como un producto carente de deficiencias? (tres respuestas correctas): *a*) componentes dentro de la tolerancia, *b*) ubicación de un interruptor encendido/apagado, *c*) sin piezas faltantes, *d*) peso del producto y *e*) confiabilidad.

44.2. Si se establece la tolerancia del producto para que el índice de capacidad del proceso sea de 1.0, ¿cuál de los siguientes procesos se acercará más al porcentaje de piezas dentro de la tolerancia cuando el proceso opere bajo control estadístico? *a*) 35%, *b*) 65%, *c*) 95%, *d*) 99% o *e*) 100%.

44.3. ¿Cuál de los siguientes principios o enfoques se acredita generalmente a G. Taguchi? (dos respuestas correctas): *a*) muestreo de aceptación, *b*) gráficas de control, *c*) función de pérdida, *d*) índice de prioridad de Pareto y *e*) diseño robusto.

44.4. En una gráfica de control, ¿a cuál de las siguientes opciones se establece igual el límite de control superior? *a*) media del proceso, *b*) media del proceso más tres desviaciones estándar, *c*) límite superior de tolerancia del diseño, o *d*) valor superior del rango máximo *R*.

44.5. ¿Para cuál de las siguientes características de productos o piezas se usa la gráfica *R*? *a*) número de rechazos en la muestra, *b*) número de piezas retrabajadas en una muestra, *c*) radio de una piezas cilíndrica o *d*) rango de valores de la muestra.

44.6. ¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor las situaciones en las que es más conveniente la gráfica *c*?: *a*) control de piezas defectuosas, *b*) valor promedio de la característica de la pieza de interés, *c*) número de defectos en una muestra o *d*) proporción de defectos en una muestra.

44.7. ¿Cuál de las siguientes opciones identifica una condición fuera de control en una gráfica de control? (tres respuestas correctas): *a*) un valor creciente de $\bar{x}$, *b*) puntos cercanos a la línea central, o *c*) *R* fuera de los límites de control de la gráfica *R* y *d*) $\bar{x}$ fuera de los límites de control de la gráfica $\bar{x}$.

PROBLEMAS

Nota: Los problemas identificados con un asterisco (*) en este grupo requieren el uso de tablas estadísticas que no se incluyen en este texto.

Capacidad del proceso y tolerancia estadística

44.1. Se establece un proceso de torneado automático para producir piezas con un diámetro medio de 6.255 cm. El proceso está en control estadístico y el resultado está normalmente distribuido con una desviación estándar de 0.004 cm. Determine la capacidad del proceso.

44.2. *En el problema anterior, la especificación de diseño de la pieza es: diámetro de 6.250 ± 0.013 cm. *a*) ¿Qué proporción de piezas cae fuera de los límites de tolerancia? *b*) Si el proceso se ajustara para que su diámetro medio de 6.250 cm y la desviación estándar permaneciera igual, ¿que proporción de piezas caería fuera de los límites de tolerancia?

44.3. Una operación de doblado de láminas metálicas produce piezas dobladas con un ángulo incluido de 92.1°. El proceso está en control estadístico y los valores del ángulo incluido se distribuyen normalmente con una desviación estándar de 0.23°. La especificación de diseño del ángulo es de 90 ± 2°. *a*) Determine la capacidad del proceso, *b*) determine el valor del índice de capacidad del proceso si el proceso pudiera ajustarse para que su media sea de 90.0°.

44.4. Un proceso de extrusión plástica produce extrusiones con una dimensión crítica de sección transversal de 28.6 mm. El proceso está bajo control estadístico y el resultado se distribuye normalmente con una desviación estándar de 0.53 mm. Determine la capacidad del proceso.

44.5. * En el problema anterior, la especificación de diseño de la pieza es de 28.0 ± 2.0 mm de diámetro. *a*) ¿Qué proporción de piezas cae fuera de los límites de tolerancia? *b*) Si el proceso se ajustara para que su diámetro promedio de 28.0 mm y la desviación estándar permaneciera igual, ¿qué proporción de piezas caería fuera de los límites de tolerancia? *c*) Con la media ajustada a 28.0 mm, determine el valor del índice de capacidad del proceso.

44.6. Un ensamble consiste en cuatro componentes apilados para crear una dimensión general de 2.500 in, con una tolerancia bilateral de 0.020 in (± 0.010 in). Las dimensiones de cada una de las piezas individuales son de 0.625 in. Todas las piezas tendrán idénticas tolerancias bilaterales. Determine la tolerancia: *a*) bajo un enfoque de diseño del peor de los casos y *b*) usando un enfoque de tolerancia estadística.

44.7. Se hace un ensamble apilando 20 piezas planas de lámina metálica para producir una estructura laminada gruesa. Todos los suajados de láminas metálicas se cortan con la misma perforadora y dado, al perfil deseado, para que el ensamble grueso tenga el mismo perfil. Todas las piezas se cortan del mismo rollo de lámina metálica, cuya especificación de grosor es de 1/16 in $\pm$ 0.002 in. El grosor del ensamble final se especifica como 1.250 $\pm$ 0.010 in. ¿Es aplicable un enfoque de tolerancia estadística en esta situación? ¿Por qué?

44.8. El ensamble de la figura P44.8 tiene una dimensión de ensamble crítica *C* de 5.000 cm. Si se hace cada pieza desde un proceso independiente con todas las medias del proceso y se establece que el grosor de las piezas sea de 2.500 cm y una desviación estándar de 0.005 cm, ¿cuál es la capacidad del proceso de la dimensión crítica *C*? Suponga que los lados opuestos de cada pieza en la dimensión de 2.50 cm son paralelos.

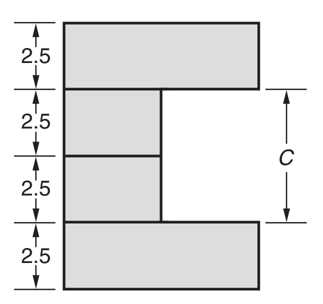


FIGURA P44.8 Ensamble para el problema 44.8 (dimensiones en cm).

44.9. Un ensamble consiste en tres piezas apiladas para formar una dimensión final de 30.0 mm con una tolerancia de $\pm$0.20 mm. Las dimensiones de piezas relevantes que forman los 30 mm totales son 5 mm, 10 mm y 15 mm. Las piezas se producen mediante operaciones de manufactura independientes, cuyas capacidades de proceso son proporcionales a sus dimensiones respectivas. Dado que las tolerancias de las piezas van a ser una proporción constante de las dimensiones respectivas, determine la tolerancia para cada pieza usando: *a*) el diseño en el peor de los casos y *b*) tolerancia estadística.

44.10. La figura P44.10 muestra un ensamble en el cual la dimensión crítica es *C*. Cada piezas usada en el ensamble, incluyendo la pieza base, tiene un grosor de 10.0 mm, con una capacidad de proceso de $\pm$0.1 mm para el grosor. Dado que el índice de capacidad del proceso para las piezas es de 1.0, y que el *PCI* para el ensamble también será de 1.0, determine la tolerancia recomendada para *C* usando: *a*) el diseño en el peor de los casos y *b*) la tolerancia estadística.

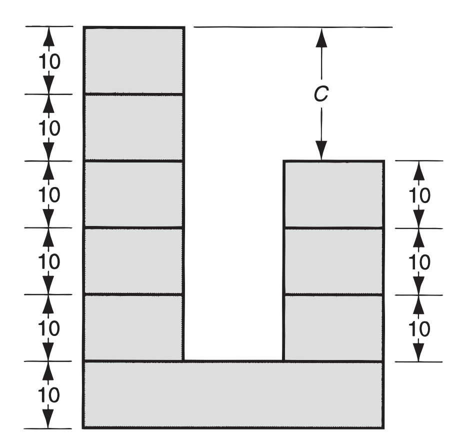


FIGURA P44.10 Ensamble para el problema 44.10 (dimensiones en mm).

44.11. Resuelva el inciso *b*) del problema anterior, excepto que el índice de capacidad del proceso para el ensamble es más conservador, 1.5. El *PCI* para las piezas individuales sigue siendo de 1.0.

Gráficas de control

44.12. Se recopilaron diez muestras de tamaño $n = 8$ de un proceso en control estadístico, y se midieron las dimensiones de interés en cada pieza, *a*) Determine los valores de la línea central, LCL y UCL para las gráficas $\bar{x}$ y *R*. Los valores calculados de $\bar{x}$ y *R* para cada muestra se dan a continuación (los valores medidos están en mm), *b*) Construya las gráficas de control y trace los datos de muestra en la gráfica.

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{x}$	9.22	9.15	9.20	9.28	9.19	9.12	9.20	9.24	9.17	9.23
R	0.24	0.17	0.30	0.26	0.27	0.19	0.21	0.32	0.21	0.23

44.13 Se recopilaron siete muestras, de cinco piezas cada una, de un proceso de extrusión que está en control estadístico y se midió el diámetro de la extrusión para cada pieza. *a*) Determine los valores de la línea central, el LCL y el LCL para las gráficas $\bar{x}$ y *R*. Los valores calculados de $\bar{x}$ y *R* para cada muestra se proporcionan a continuación (los valores medidos están en pulgadas). *b*) Construya las gráficas de control y trace los datos de muestra en las gráficas.

S	1	2	3	4	5	6	7
$\bar{x}$	1.002	0.999	0.995	1.004	0.996	0.998	1.006
R	0.010	0.011	0.014	0.020	0.008	0.013	0.017

44.14. En 12 muestras de tamaño $n = 7$, el valor promedio de las medias de la muestra es de $x = 6.860$ cm para la dimensión que interesa, y la media de los rangos de las es de muestras $\bar{R} = 0.027$ cm. Determine *a*) los límites de control superior e inferior para la gráfica $\bar{x}$ y *b*) los límites de control superior e interior para la gráfica *R*. *c*) ¿Cuál es su mejor estimado de la desviación estándar del proceso?

44.15. En nueve muestras de tamaño $n = 10$, la gran media de las muestras es $\bar{x} = 100$ para la característica de interés y la media de los rangos de las muestras es $\bar{R} = 8.5$ es $= 8.5$. Determine *a*) los límites de control superior e inferior para la gráfica $\bar{x}$ y *b*) los límites de control superior e inferior para la gráfica *R*. *c*) Con base en los datos proporcionados, estime la desviación estándar del proceso.

44.16. Se construirá una gráfica *p*. Se recopilaron seis muestras de 25 piezas cada una y la cantidad promedio de defectos por muestra fue de 2.75. Determine la línea central, el LCL y el UCL para la gráfica *p*.

44.17. Se tomaron diez muestras de igual tamaño para preparar una gráfica *p*. La cantidad total de piezas en estas diez muestras fue de 900, y el número total de defectos encontrados fue de 117. Determine la línea central, el LCL y el UCL para la gráfica *p*.

44.18. El rendimiento de chips buenos durante cierto paso en el procesamiento de silicio de circuitos integrados, promedia 91%. El número de chips por oblea es de 200. Determine la línea central, el LCL y el UCL para la gráfica *p* que podría usarse para este proceso.

44.19. Los límites de control superior e inferior para una gráfica *p* son LCL $= 0.19$ y UCL $= 0.24$. Determine el tamaño de muestra *n* que se usa con esta gráfica de control.

44.20. Los límites de control superior e inferior para una gráfica *p* son LCL $= 0$ y UCL $= 0.10$. Determine el tamaño de muestra mínimo posible *n* que sea compatible con esta gráfica de control.

44.21. Se inspeccionaron doce carros después del ensamble final. El número de defectos encontrados oscila entre 87 y 139 defectos por automóvil, con un promedio de 116. Determine la línea central y los límites de control superior e inferior para la gráfica *c* que pueden usarse en esta situación.

45 MEDICIÓN E INSPECCIÓN

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

Un requerimiento básico en la manufactura es que el producto y sus componentes cumplan las especificaciones establecidas por el ingeniero de diseño. Las especificaciones de diseño incluyen las dimensiones, las tolerancias y los acabados superficiales de las piezas individuales que comprenden el producto. Estos atributos se definieron en el capítulo 5. Aquí se considera cómo medirlos e inspeccionarlos.

La ***medición*** es un procedimiento en el cual se compara una cantidad desconocida con un estándar conocido, usando un sistema de unidades aceptado y consistente. La medición puede involucrar una simple regla lineal para establecer la escala de la longitud de una pieza o puede requerir una medición compleja de fuerza contra deflexión durante una prueba de tensión. La medición proporciona un valor numérico de la cantidad de interés, dentro de ciertos límites de exactitud y precisión.

La ***inspección*** es un procedimiento en el cual se examina alguna característica de una pieza o producto, como una dimensión, para determinar si se apega o no a la especificación del diseño. Muchos procedimientos de inspección se basan en técnicas de medición, mientras que otros usan métodos de calibración. La ***calibración*** determina simplemente si la característica de la pieza cumple o no con la especificación del diseño, si la pieza pasa o no la inspección. Por lo general es más rápida que la medición, pero proporciona información insuficiente del valor real de la característica de interés.

El capítulo empieza con un análisis de los principios de medición e inspección. Después se revisan los instrumentos usados para medir e inspeccionar dimensiones de piezas y características superficiales, desde reglas lineales básicas hasta máquinas de medición automatizada por computadora.

45.1 METROLOGÍA

La ***metrología*** es la ciencia de la medición. Se relaciona con seis cantidades fundamentales: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura y radiación luminosa. A partir de éstas, se deriva la mayoría de las otras cantidades físicas, como el área, el volumen, la velocidad, la aceleración, la fuerza, el voltaje eléctrico, la energía térmica, etc. En la metrología de manufactura, el principal interés es la medición de la longitud y sus diversas formas de manifestarse en una pieza o producto. Éstas incluyen longitud, anchura, profundidad, diámetro, rectitud, planicie y redondez; incluso la rugosidad superficial se define en términos de longitud.

45.1.1 Principios de medición

Se aplican ciertos conceptos y principios en casi todas las mediciones. Los más importantes son la exactitud y la precisión.

Exactitud y precisión La ***exactitud*** es el grado en el que un valor medido coincide con el valor verdadero de la cantidad de interés. Un procedimiento de medición es exacto cuando no tiene errores sistemáticos. Los ***errores sistemáticos*** son desviaciones positivas o negativas del valor verdadero que son consistentes de una medición a la siguiente.

La ***precisión*** es el grado en el que se puede repetir el proceso de medición. Una buena precisión significa que se reducen al mínimo los errores aleatorios en el procedimiento de medición. Por lo general, los errores aleatorios se asocian con la participación humana en el proceso de medición. Entre los ejemplos están las variaciones en la preparación, la lectura imprecisa de la escala, las aproximaciones redondeadas, etc. Entre los componentes no humanos que contribuyen al error aleatorio están los cambios de temperatura, el desgaste gradual y/o el desajuste en los elementos funcionales de los dispositivos y otras variantes. Se supone que los ***errores aleatorios*** obedecen a una distribución estadística normal cuya media es cero y cuya desviación estándar está dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i = \mu)^2}{n}} \qquad (45.1)$$

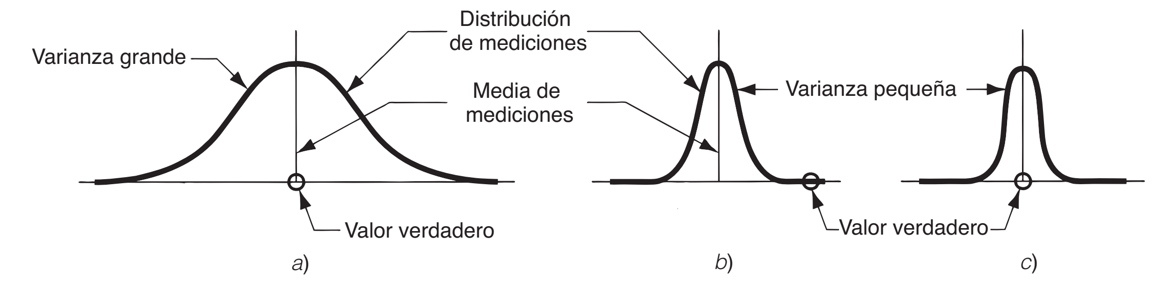


FIGURA 45.1 Exactitud contra precisión en la medición: *a*) exactitud alta, pero precisión baja; *b*) exactitud baja, pero precisión alta; *c*) exactitud y precisión altas.

donde σ = desviación estándar de la población; x_i = variable de interés; μ = media de la población; y n = número de miembros en la población. La distribución normal posee ciertas propiedades bien definidas, incluyendo el hecho de que 99.73% de la población se encuentra dentro de $\pm 3\sigma$ de la media de la población. Con frecuencia esto se considera como una indicación de la precisión de un instrumento de medición.

La distinción entre exactitud y precisión se muestra en la figura 45.1. En *a*), el error aleatorio en la medición es grande, lo que indica una precisión baja; pero el valor de la media de medición coincide con el valor verdadero, lo que indica gran exactitud. En *b*) el error de medición es pequeño (buena precisión), pero el valor medido difiere sustancialmente del valor verdadero (baja exactitud). En *c*), tanto la exactitud como la precisión son buenas.

Por supuesto, no es posible construir un instrumento de medición que tenga una exactitud perfecta (ningún error sistemático) y una precisión perfecta (ningún error aleatorio). La exactitud del instrumento se mantiene mediante una calibración adecuada y regular (que se explicará posteriormente). La precisión se obtiene seleccionando la tecnología de instrumento adecuada para la aplicación. Una directriz que se aplica con frecuencia para determinar el nivel de precisión correcto es la ***regla de 10***, que establece que el dispositivo de medición debe ser 10 veces más preciso que la tolerancia especificada. Por lo tanto, si la tolerancia que se medirá es ±0.25 mm (±0.010 in), entonces el dispositivo de medición debe tener una precisión de ±0.025 mm (±0.001 in).

Otras características de los instrumentos de medición Otro aspecto de un instrumento de medición es su capacidad para captar diferencias muy pequeñas en la cantidad de interés. La indicación de esta característica es la variación más pequeña de la cantidad que puede detectar el instrumento. Por lo general se usan los términos ***resolución*** y ***sensibilidad*** para este atributo de un dispositivo de medición.

Otras características deseables de un instrumento de medición incluyen la facilidad de calibración, la estabilidad, la velocidad de respuesta, el rango de operación amplio, la confiabilidad alta y el costo bajo. La mayoría de los dispositivos de medición deben calibrarse en forma periódica. La ***calibración*** es un procedimiento en el cual el instrumento de medición se verifica contra un estándar conocido. Por ejemplo, la calibración de un termómetro implicaría verificar su lectura en hielo (de agua pura). Por conveniencia, al usar el instrumento de medición, el procedimiento de calibración debe ser rápido y simple. Una vez que se calibra, el instrumento debe ser capaz de conservar su calibración y continuar midiendo la cantidad sin desviarse del estándar. Esta capacidad de conservar la calibración se llama ***estabilidad*** y la tendencia del dispositivo a perder gradualmente su precisión en relación con el estándar se denomina ***desviación***.

Algunas mediciones, en especial en un ambiente de manufactura, deben hacerse con rapidez. La capacidad de un instrumento de medición para indicar la cantidad en un mínimo de tiempo se denomina ***velocidad de respuesta***. En forma ideal, el periodo debe ser cero; sin embargo, éste es un ideal imposible. Para un dispositivo de medición automática,

la velocidad de respuesta generalmente se toma como el lapso de tiempo entre cuando ocurre un cambio en la cantidad de interés y cuando el dispositivo es capaz de indicar el cambio dentro de cierto porcentaje pequeño del valor verdadero.

El instrumento de medición debe poseer un ***rango de operación amplio***, que es la capacidad de medir la variable física en un periodo de interés práctico para el usuario. Por supuesto, la ***confiabilidad alta***, que puede definirse como la ausencia de fallas frecuentes del dispositivo, y el ***bajo costo*** son atributos deseables en cualquier equipo de ingeniería.

45.1.2 Estándares y sistemas de medición

Un aspecto común en cualquier procedimiento de medición es la comparación del valor desconocido con un estándar conocido. Dos aspectos de un estándar resultan críticos: 1) debe ser constante, es decir, no cambiar con el tiempo; y 2) debe basarse en un sistema de unidades que sea consistente y que sea aceptado por los usuarios. En la época moderna, los estándares para longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura y luz pueden definirse en términos de fenómenos físicos, porque existe la confianza de que no se alterarán. Por ejemplo, el estándar para un metro, la cantidad de longitud básica del Sistema Internacional se define como la distancia que viaja la luz en el vacío en 1/299 792 458 de un segundo (¿no le parece muy útil?).

En el mundo han evolucionado y predominado dos sistemas de unidades: 1) el sistema de uso común en Estados Unidos (USCS, por sus siglas en inglés), y 2) el Sistema Internacional de Unidades (o SI), que se conoce popularmente como el sistema métrico (Nota histórica 45.1). Estos dos sistemas son muy conocidos. A lo largo del libro se usan ambos en paralelo. El sistema métrico se utiliza ampliamente en casi cualquier parte del mundo industrializado excepto en Estados Unidos, que se ha apegado de manera obstinada a su U.S.C.S. Gradualmente, Estados Unidos también está adoptando el SI.

Nota histórica 45.1 *Sistemas de medición*

Los sistemas de medición en las civilizaciones antiguas se basaban en las dimensiones del cuerpo humano. Los egipcios implantaron el codo como un estándar de medición lineal alrededor del año 3000 a.C., el cual se usó ampliamente en el mundo antiguo. El ***codo*** se definió como la longitud de un brazo y una mano humanas desde el codo hasta la punta de los dedos. Aunque aparentemente plagado de dificultades debido a las variaciones en las longitudes de los brazos, el codo se estandarizó en la forma de un codo maestro de granito. Este codo estándar de 524 mm (26.6 in) se usó para producir otras barras de codos en todo Egipto. El codo estándar se dividió en ***dedos*** (de la anchura de un dedo humano), con 28 dedos por codo. Cuatro dedos equivalían a una ***palma*** y cinco a una ***mano***. De esta forma se desarrolló en el mundo antiguo el sistema de medidas y estándares. En épocas más recientes el dominio del mundo mediterráneo antiguo pasó a los griegos y después a los romanos. La medida lineal básica de los griegos era el ***dedo*** (alrededor de 19 mm o 3/4 in), y 16 dedos equivalían a un ***pie***. Los romanos adoptaron y adaptaron el sistema griego, específicamente el pie, dividiéndolo en 12 partes (llamadas ***unciae*** por los romanos). Los romanos definieron 5 pies como un ***paso*** y 5 000 pies como una ***milla*** (un número redondo, ¿cómo terminó en 5 280 pies por milla?).

En la Europa medieval se crearon diferentes sistemas de medición nacionales y regionales, muchos de ellos basados en los estándares romanos. En el mundo occidental surgieron dos sistemas primarios, el sistema inglés y el sistema métrico El sistema inglés definió la yarda "como la distancia de la punta del dedo pulgar a la punta de la nariz del rey inglés Enrique I" [15]. La yarda se dividió en tres pies y éstos, a su vez, en 12 pulgadas. Como las colonias americanas estaban sometidas a Inglaterra, fue natural que adoptaran el mismo sistema de medición en el momento de su independencia. Éste se convirtió en el sistema de uso común en Estados Unidos (USCS).

La propuesta inicial de un sistema métrico se acredita al vicario G. Mouton en Lyon, Francia, alrededor de 1670. Su propuesta incluía tres atributos importantes que después se incorporaron en los estándares métricos: 1) la unidad básica se definía en términos de una medición de la Tierra, que se suponía constante, la medida de longitud que propuso el vicario se basaba en la longitud de un arco de un minuto de longitud; 2) las unidades se subdividían en forma decimal y 3) se usaban prefijos racionales para las unidades. La propuesta de Mouton se analizó y debatió entre los científicos de Francia durante los siguientes 125 años. Uno de los resultados de la Revolución Francesa fue la adopción

del sistema métrico de pesos y medidas (en 1795), La unidad básica de longitud era el metro, que se definió entonces como 1/10 000 000 de la longitud del meridiano situado entre el Polo Norte y el Ecuador y que pasaba por París (por supuesto). Los múltiplos y las subdivisiones del metro se basaban en los prefijos griegos.

La divulgación del sistema métrico en Europa durante la primera parte del siglo XIX fue estimulada por los éxitos militares de los ejércitos franceses bajo el mando de Napoleón. En otras partes del mundo, la adopción del sistema métrico ocurrió a lo largo de muchos años y frecuentemente fue motivada por cambios políticos significativos; éste fue el caso de Japón, China, la Unión Soviética y Latinoamérica.

Un acta del Parlamento Británico de 1963 redefinió el sistema inglés de pesos y medidas en términos de unidades métricas e impuso un cambio hacia el sistema métrico dos años después, con lo que Gran Bretaña se alineó con el resto de Europa. Esto dejó a Estados Unidos como la única nación industrial importante que no utilizaba el sistema métrico. En 1960, una conferencia internacional sobre pesos y medidas celebrada en París llegó a un acuerdo sobre los nuevos estándares basados en el sistema métrico. Así, el sistema métrico se convirtió en el Sistema Internacional (SI).

45.2 PRINCIPIOS DE INSPECCIÓN

La ***inspección*** implica el uso de técnicas de medición y calibración para determinar si un producto, sus componentes, subensambles o materiales iniciales se apegan a las especificaciones del diseño. El diseñador del producto establece las especificaciones, y para los productos mecánicos éstas se refieren a las dimensiones, acabados superficiales y características similares. La inspección se realiza antes, durante y después de la manufactura.

Las inspecciones se dividen en dos tipos: 1) ***inspección por variables***, en la cual las dimensiones del producto o pieza se miden mediante instrumentos de medición adecuados; y 2) ***inspección por atributos***, en la cual las piezas se calibran para determinar si están dentro de los límites de tolerancia o no. La ventaja de medir las dimensiones de una pieza es que se obtienen datos acerca de sus valores reales. Los datos pueden registrarse durante un tiempo y usarse después para analizar tendencias en el proceso de manufactura. Es posible hacer ajustes en el proceso con base en los datos, de manera que las piezas futuras se produzcan con valores más cercanos al diseño nominal. Cuando una dimensión de piezas solamente se calibra, todo lo que se sabe es si está dentro de la tolerancia, si es demasiado grande o si es demasiado pequeña. Por otra parte, la calibración puede hacerse con rapidez y a un costo bajo.

45.2.1 Prueba contra inspección

Mientras la inspección determina la calidad del producto en relación con las especificaciones de diseño, la prueba generalmente hace referencia a los aspectos funcionales del producto. ¿Funciona el producto adecuadamente?, ¿continuará funcionando durante un periodo considerable?, ¿funcionará en ambientes de temperatura y humedad extremas? En el control de calidad, la ***prueba*** es un procedimiento en el cual el producto, subensamble, pieza o material se observan en condiciones que podrían encontrarse durante el servicio. Por ejemplo, se prueba un producto haciéndolo operar durante cierto tiempo para determinar si funciona en forma correcta. Si pasa la prueba, se certifica para entregarlo al cliente.

En ocasiones, la prueba de un componente o material es dañina o destructiva. En estos casos, los artículos deben probarse con base en un muestreo. El costo de las pruebas destructivas es significativo y se realizan grandes esfuerzos para poner en práctica métodos que no provoquen la destrucción del artículo. Estos métodos se conocen como una ***prueba no destructiva*** (NDT, por sus siglas en inglés) o una ***evaluación no destructiva*** (NDE).

45.2.2 Inspección manual y automatizada

Los procedimientos de inspección se realizan frecuentemente en forma manual. En general, el trabajo es aburrido y monótono, y aun así se necesitan precisión y exactitud altas. En ocasiones se requieren horas para medir las dimensiones importantes de una sola pieza. Debido al tiempo y al costo de la inspección manual, generalmente se usan procedimientos de muestreo estadístico para reducir la necesidad de inspeccionar todas las piezas.

Muestreo contra inspección al 100% Cuando se usa la inspección de muestreo, por lo general el número de piezas en la muestra es pequeño en comparación con la cantidad de piezas producidas. El tamaño de la muestra puede ser únicamente el 1% de la corrida de producción. Debido a que no se miden todos los artículos en la población, en cualquier procedimiento de muestreo existe el riesgo que pasen piezas defectuosas. Un propósito del muestreo estadístico es definir el riesgo esperado, esto es, determinar la razón de defectos promedio que pasará por el procedimiento de muestreo. El riesgo se reduce incrementando el tamaño de la muestra y la frecuencia con que ésta se recopila. Pero permanece el hecho de que debe tolerarse algo menos que el 100% de buena calidad como el precio de usar un procedimiento de muestreo.

En teoría, la única forma de obtener una calidad al 100% es mediante una inspección del 100%; así, se localizan todos los defectos y sólo las piezas de buena calidad pasan el procedimiento de inspección. Sin embargo, cuando se hace una inspección al 100% en forma manual se encuentran dos problemas. El primero es el gasto involucrado. En lugar de dividir el costo de inspeccionar la muestra entre la cantidad de piezas en la corrida de producción, el costo de inspección unitaria se aplica a todas las piezas del lote. El costo de inspección en ocasiones supera el costo de fabricación. Segundo, en la inspección manual al 100%, casi siempre hay errores asociados con el procedimiento. La tasa de errores depende de la complejidad y dificultad de la tarea de inspección y cuánto juicio debe aplicar la persona que realiza la inspección. Estos factores se complican por el cansancio del operador. Los errores significan que se aceptará cierta cantidad de piezas de poca calidad y que se rechazará cierta cantidad de piezas de buena calidad. Por lo tanto, una inspección al 100% que utilice métodos manuales no garantiza una buena calidad del 100% del producto.

Inspección al 100% automatizada La automatización del proceso de inspección ofrece un modo de superar los problemas asociados con la inspección al 100% manual. La ***inspección automatizada*** se define como la automatización de uno o más pasos en el procedimiento de inspección como: 1) la presentación automatizada de las piezas mediante un sistema de manejo automatizado, donde un operador humano aún realiza el proceso de inspección real (por ejemplo, la inspección visual para buscar defectos en las piezas); 2) la carga manual de las piezas en una máquina de inspección automática; y 3) una celda de inspección completamente automatizada en la cual las piezas se presentan y se inspeccionan en forma automática. La automatización de la inspección también puede incluir 4) la recopilación de datos computarizados a partir de instrumentos de medición electrónicos.

Una inspección al 100% automatizada puede integrarse con el proceso de manufactura para realizar alguna acción relativa con el proceso: 1) clasificación de las piezas y(o) 2) retroalimentación de datos para el proceso. La ***clasificación de las piezas*** significa dividir los artículos en dos o más niveles de calidad. La separación básica incluye dos niveles: aceptable y no aceptable. Algunas situaciones incluyen más de dos niveles, como aceptable, retrabajable y desperdicio. La clasificación y la inspección pueden combinarse en la misma estación. Otras instalaciones ubican una o más inspecciones a lo largo de la línea de procesamiento, con la estación de clasificación cerca del final de la línea. Los datos de inspección se analizan y se envían instrucciones a la estación de clasificación, indicando qué acción se requiere para cada pieza.

La ***retroalimentación*** de los datos de inspección hacia la corriente de operaciones de manufactura permite realizar ajustes en el proceso para reducir la variabilidad y mejorar la calidad. Si las medidas de inspección indican que el resultado se está alejando de los límites de tolerancia (por ejemplo, debido al desgaste de herramienta), se hacen correcciones a los parámetros del proceso para mover el resultado hacia el valor nominal. Por lo tanto, el resultado se mantiene dentro de un rango de variabilidad más pequeño del que es posible obtener con los métodos de inspección por muestreo.

45.2.3 Inspección por contacto contra inspección sin contacto

Existe una variedad de tecnologías de medición y calibración para inspección. Las posibilidades pueden dividirse entre los métodos de inspección por contacto y sin contacto. La ***inspección por contacto*** implica el uso de una sonda mecánica u otro dispositivo que hace contacto con el objeto que se inspecciona. Por su naturaleza, esta inspección generalmente se utiliza para medir o calibrar alguna dimensión física de la pieza. Se realiza en forma manual o automática. La mayoría de los dispositivos de medición y calibración tradicionales descritos en la siguiente sección se relacionan con la inspección por contacto. Un ejemplo de un sistema automatizado de medición por contacto es la máquina de medición de coordenadas (sección 45.5.1).

Los métodos de ***inspección sin contacto*** utilizan un sensor localizado a cierta distancia del objeto para medir o calibrar la(s) característica(s) deseada(s). Las ventajas comunes de la inspección sin contacto son: 1) ciclos de inspección más rápidos y 2) se evita que puedan ocurrir daños a las partes debido al contacto. Con frecuencia los métodos sin contacto pueden realizarse en la línea de producción sin ningún manejo especial. En contraste, la inspección por contacto requiere un posicionamiento especial de la pieza, lo cual implica su remoción de la línea de producción. Asimismo, los métodos de inspección sin contacto son inherentemente más rápidos, debido a que emplean una sonda estacionaria que no requiere la colocación de cada pieza. Por el contrario, la inspección por contacto requiere colocar la sonda de contacto contra la pieza, lo que consume tiempo.

Las tecnologías de inspección sin contacto se clasifican como ópticas y no ópticas. Entre los métodos ópticos más destacados están los láser (sección 45.5.2) y la visión de máquina (sección 45.5.3). Los sensores de inspección no óptica incluyen las técnicas de campo eléctrico, las técnicas de radiación y los ultrasonidos (sección 45.5.4).

45.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y CALIBRADORES CONVENCIONALES

En esta sección, se consideran los diversos instrumentos y calibradores que se operan en forma manual y que se usan para medir dimensiones como longitud, profundidad y diámetro, así como características como ángulos, rectitud y redondez. Este equipo se encuentra en los laboratorios de metrología, los departamentos de inspección y las salas de herramientas. El tema inicial lógico son los bloques calibradores de precisión.

45.3.1 Bloques calibradores de precisión

Los bloques de calibradores de precisión son los estándares contra los que se comparan otros instrumentos de medición y calibradores de dimensión. Por lo general, los bloques de calibración tienen forma cuadrada o rectangular. Las superficies de medición tienen un acabado considerado dimensionalmente exacto y paralelo hasta dentro de varias millonésimas de una pulgada y pulidos con un acabado tipo espejo. Existen diversos grados de bloques de calibración de precisión, con tolerancias más estrechas para grados de precisión más altos. El grado más alto, el ***estándar maestro de laboratorio***, está hecho a una tolerancia de ±0.000 03 mm (±0.000 001 in). Dependiendo del grado de dureza y del precio que el usuario esté dispuesto a pagar, los bloques de calibración pueden hacerse de varios materiales duros, entre los que se encuentran el acero para herramienta, el acero chapeado con cromo, el carburo de cromo, o el carburo de tungsteno.

Existen bloques de calibración de precisión disponibles en ciertos tamaños estándares o en juegos, que contienen diversos bloques de tamaños distintos. Los tamaños de un bloque de calibración en un conjunto se determinan en forma sistemática para que puedan apilarse con el propósito de obtener virtualmente cualquier dimensión deseada dentro de 0.0025 mm (0.0001 in).

Para mejores resultados, los bloques de calibración deben usarse sobre una superficie plana de referencia, como una placa superficial. Una ***placa superficial*** es un bloque sólido y grande cuya superficie superior tiene un acabado totalmente plano. Casi todas las placas de superficie actuales están hechas de granito duro. El granito tiene la ventaja de ser duro, no oxidarse, no ser magnético, desgastarse con lentitud, es térmicamente estable y fácil de mantener.

Los bloques de calibración y otros instrumentos de alta precisión deben usarse en condiciones de temperatura estándar y otros factores que podrían afectar adversamente la medición. Por acuerdo internacional, se ha establecido que la temperatura estándar es de 20 °C (68 °F). Los laboratorios de metrología funcionan en este estándar. Si se usan bloques de calibración u otros instrumentos de medición en un ambiente de fábrica, donde la temperatura difiere de este estándar, se requieren correcciones para la expansión o contracción térmicas. Asimismo, los bloques de calibración funcionales que se usan para inspección en el taller están sujetos al desgaste y deben calibrarse periódicamente contra bloques de calibración de laboratorio más precisos.

45.3.2 Instrumentos de medición para dimensiones lineales

Los instrumentos de medición se dividen en dos puntos: graduados y no graduados. Los ***dispositivos de medición graduados*** incluyen un conjunto de marcadores (llamados ***graduaciones***) sobre una escala lineal o angular, contra la cual puede compararse la característica de interés del objeto. Los ***dispositivos de medición no graduados*** no poseen tal escala y se usan para hacer comparaciones entre las dimensiones o para transferir una dimensión y efectuar su medición mediante un dispositivo graduado.

El más básico de los dispositivos de medición graduados es la ***regla*** (hecha de acero y con frecuencia llamada una ***regla de acero***), que se usa para medir dimensiones lineales. Las reglas están disponibles en diversas longitudes. Las longitudes métricas incluyen 150, 300, 600 y 1000 mm, con graduaciones de 1 o 0.5 mm, los tamaños comunes en Estados Unidos son 6, 12 y 24 in, con graduaciones de 1/32, 1/64 o 1/100 in.

Existen ***calibradores*** en estilo graduado y no graduado. Un calibrador no graduado (que se conoce simplemente como ***calibrador***) consta de dos patas unidas mediante un mecanismo articulado, como se muestra en la figura 45.2. Los extremos de las patas están hechos para entrar en contacto con las superficies del objeto que se mide y la articulación está diseñada para sostener las patas en posición durante el uso. Los contactos apuntan hacia adentro o hacia afuera. Cuando apuntan hacia adentro, como en la figura 45.2, el instrumento se denomina un ***calibrador externo*** y se usa para medir dimensiones externas como un diámetro. Cuando los contactos apuntan hacia afuera, se denomina un ***calibrador interno***, el cual se usa para medir la distancia entre dos superficies internas. Un instrumento similar a la configuración del calibrador es el ***compás divisor***, excepto que ambas piernas son rectas y terminan en contactos duros con puntas agudas. Los divisores se usan para establecer distancias en escala entre dos puntos o líneas sobre una superficie y para inscribir círculos o arcos sobre una superficie.

Existen diversos calibradores graduados para diferentes propósitos de medición. El más simple es el ***calibrador deslizable***, una regla de acero a la cual se le añaden dos quijadas, una fija en un extremo de la regla y la otra móvil, como se muestra en la figura 45.3. Los calibradores deslizables se usan para mediciones internas o externas, dependiendo si se usan las caras internas o externas de la quijada. Para usarlo, las quijadas se ponen en contacto con las superficies de las piezas que se van a medir y la posición de la quijada móvil indica la dimensión de interés. Los calibradores deslizables permiten mediciones más precisas y exactas que las reglas simples. Un refinamiento del calibrador deslizable es el ***calibrador***

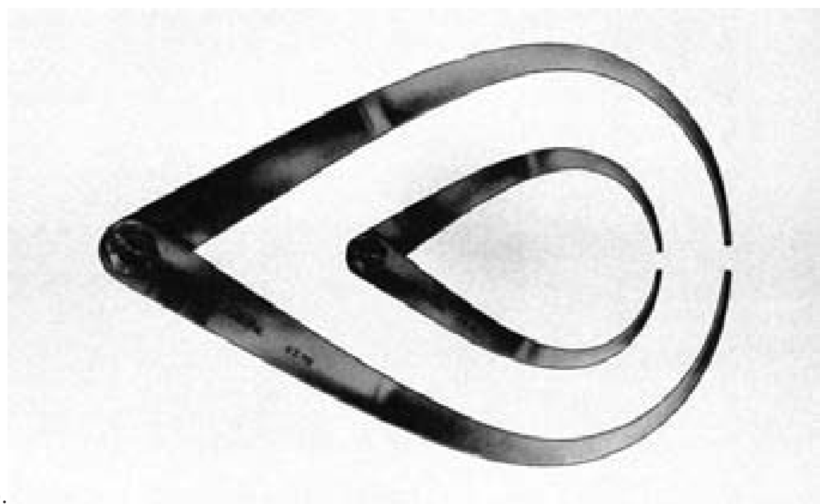


FIGURA 45.2 Dos tamaños de calibradores externos (cortesía de L. S. Starrett Co.).

vernier, que se muestra en la figura 45.4. En este dispositivo, la quijada móvil incluye una escala de vernier, llamada así en honor de P. Vernier (1580-1637), el matemático francés que la inventó. El vernier proporciona graduaciones de 0.01 mm en el SI (y 0.001 pulgadas en la escala de uso común en Estados Unidos), mucho más preciso que el calibrador deslizable.

Las variaciones del calibrador vernier incluyen el ***calibrador vernier de altura***, usado para medir la altura de un objeto en relación con una superficie plana, como una placa: y el ***calibrador vernier de profundidad***, para medir la profundidad de un agujero, ranura u otra cavidad en relación con una superficie superior.

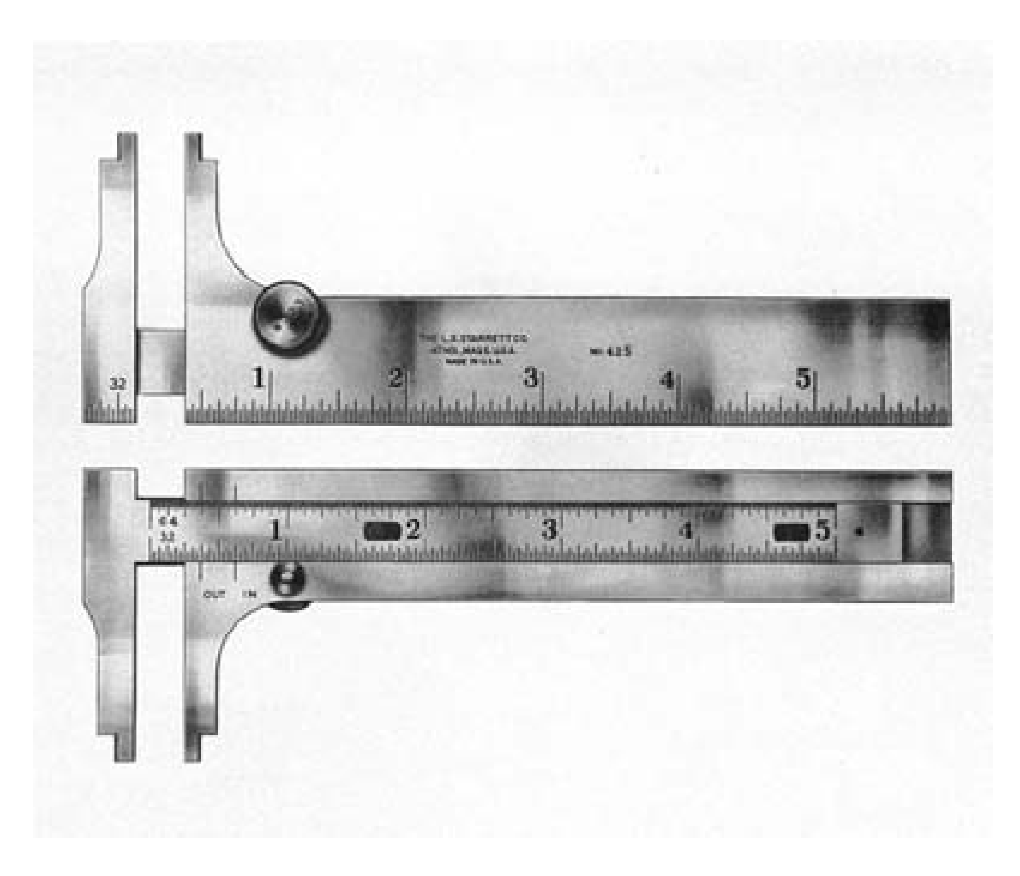


FIGURA 45.3 Calibrador deslizable; se muestran ambos lados del instrumento. (Cortesía de L. S. Starrett Co.)

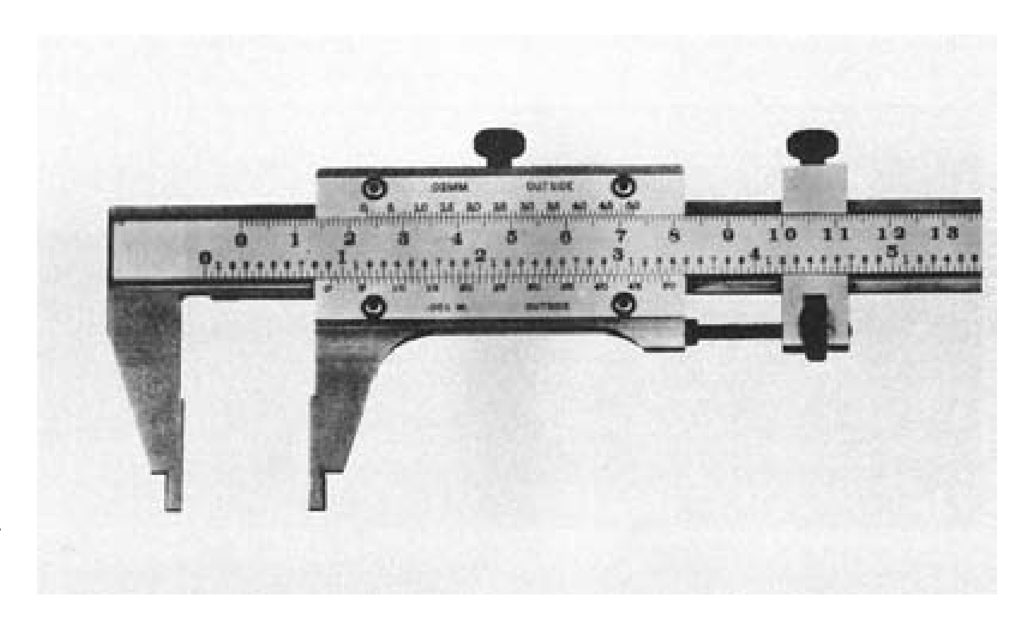


FIGURA 45.4 Calibrador vernier (cortesía de L. S. Starrett Co.).

El ***micrómetro*** se usa ampliamente y es un dispositivo de medición muy exacto, su forma más común consiste en un husillo y en un yunque en forma de C, como se muestra en la figura 45.5. El mango se mueve en relación con el yunque fijo mediante una rosca de tornillo exacta. En un micrómetro común en USCS cada rotación del mango proporciona 0.025 pulgadas de viaje lineal. A cada eje se conecta un manguito graduado con 25 marcas alrededor de su circunferencia; cada marca corresponde a 0.001 in. Por lo general, la manga del micrómetro está equipada con un vernier, el cual permite resoluciones tan estrechas como 0.001 in. En un micrómetro con una escala métrica, las graduaciones son de 0.01 mm. Los micrómetros (y calibradores graduados) modernos están disponibles con dispositivos electrónicos que despliegan una lectura digital de la medición (como en la figura). Estos instrumentos son más fáciles de leer y eliminan mucho del error humano asociado con la lectura en los dispositivos graduados convencionales.



FIGURA 45.5 Micrómetro externo, tamaño estándar de una pulgada con lectura digital. (Cortesía de L. S. Starrett Co.)

Los tipos de micrómetro más comunes son: 1) el ***micrómetro externo***, figura 45.5, también llamado ***micrómetro exterior***, que se fabrica con diversos tamaños estándar de yunque; 2) el ***micrómetro interno***, o ***micrómetro interior***, que consiste en un ensamble de cabeza y un conjunto de varillas de diferentes longitudes para medir dimensiones exteriores que pudieran encontrarse; y 3) ***micrómetro de profundidad***, similar a un micrómetro interno pero adaptado para medir profundidades de orificios.

45.3.3 Instrumentos comparativos

Los instrumentos comparativos se usan para confrontar las dimensiones entre dos objetos, como una pieza de trabajo y una superficie de referencia. En general, no son capaces de proporcionar una medición absoluta de la cantidad que interesa; en lugar de eso, miden la magnitud y dirección de la desviación entre dos objetos. Entre los instrumentos que se encuentran en esta categoría están los calibradores mecánicos y electrónicos.

Calibradores mecánicos: indicadores de carátula Los ***calibradores mecánicos*** están diseñados para magnificar en forma mecánica la desviación, para permitir la observación. El instrumento más común en esta categoría es el ***indicador de carátula***, figura 45.6, que convierte y magnifica el movimiento lineal de un apuntador de contacto en la rotación de una aguja de carátula. La carátula se gradúa en unidades pequeñas como 0.01 mm (0.001 in). Los indicadores de carátula se usan en muchas aplicaciones para medir rectitud, planicie, paralelismo, cuadratura, redondez y medidas exteriores. En la figura 45.7 se muestra una preparación típica para una medición exterior.

Calibradores electrónicos Los ***calibradores electrónicos*** son una familia de instrumentos de medición y calibración, basados en transductores, capaces de convertir un desplazamiento lineal en una señal eléctrica, que se amplifica y transforma en un formato de datos conveniente, como la lectura digital que se muestra en la figura 45.5. En años recientes se han incrementado rápidamente las aplicaciones de los calibradores, conducidas por avances en la tecnología de microprocesadores. Están sustituyendo en forma gradual a muchos de los dispositivos de medición y calibración convencionales. Entre las ventajas de los calibradores electrónicos están: 1) buena sensibilidad, exactitud, precisión, repetibilidad y velocidad de respuesta: 2) capacidad para medir dimensiones muy pequeñas, hasta de 0.025 μm (1 μ-in); 3) facilidad de operación; 4) reducción de errores humanos; 5) despliegue de la señal electrónica en diversos formatos y 6) capacidad de interconexión con sistemas de computadoras para procesamiento de datos.



FIGURA 45.6 Indicador de carátula: la vista superior muestra la carátula y la cara graduada; la vista inferior muestra la parte posterior del instrumento sin la placa que la cubre. (Cortesía de Federal Products Co., Providence, RI.)

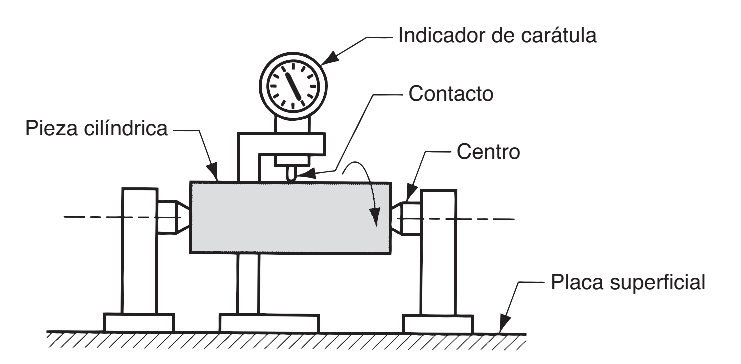


FIGURA 45.7 Preparación de indicador de carátula, para medir una pieza externa; conforme la pieza gira alrededor de su centro, las variaciones en la superficie exterior en relación con el centro se indican en la carátula.

45.3.4 Calibradores fijos

Un calibrador fijo es una réplica física de la dimensión de una pieza que se va a inspeccionar o medir. Existen dos categorías básicas: el calibrador maestro y el calibrador límite. Un ***calibrador maestro*** es una réplica directa del tamaño nominal de la dimensión de la pieza. Por lo general, se usa para preparar un instrumento de medición comparativa, por ejemplo un indicador de carátula; o para calibrar un dispositivo de medición.

Un ***calibrador límite*** se fabrica para ser una réplica inversa de la dimensión de la pieza y se diseña para verificar la dimensión de uno o más de sus límites de tolerancia. Un calibrador límite con frecuencia tiene dos calibradores en uno, el primero comprueba el límite inferior de la tolerancia en la dimensión de la pieza y el otro verifica el límite superior. Popularmente, estos calibradores se conocen como ***calibradores pasa/no pasa***, debido a que un límite del calibrador permite que la pieza se inserte, mientras que el otro límite lo impide. El ***límite pasa*** se usa para verificar la dimensión en su máxima condición material; éste es el tamaño máximo para una característica interna, como un orificio y el tamaño máximo para una característica externa como un diámetro exterior. El ***límite no pasa*** se usa para revisar la mínima condición material de la dimensión en cuestión.

Los calibradores fijos deben ser dimensionalmente estables y resistentes al desgaste. Los materiales que se usan generalmente para estas herramientas son aleaciones de acero o acero para herramienta con tratamiento térmico y acabado de alta exactitud. Cuando la resistencia al desgaste es muy importante se usa carburo cementado. La regla de 10 se usa para determinar tolerancias cuando se fabrica un calibrador fijo; esto es, la tolerancia de la dimensión del calibrador corresponde a un 10% de la tolerancia en la dimensión de la pieza que se va a verificar.

Los calibradores de límite comunes son los calibradores de contacto y de anillo que se usan para verificar las dimensiones de piezas externas y los calibradores de inserción se utilizan para revisar dimensiones internas. Un ***calibrador de contacto*** consiste en un marco con forma de C con superficies de calibración localizadas en las quijadas del marco, como se muestra en la figura 45.8. Tiene dos botones de calibración, el primero es el calibrador pasa y el segundo es el calibrador no pasa. Los calibradores de contacto se usan para comprobar dimensiones externas como diámetro, anchura, grosor y superficies similares.

Los ***calibradores de anillo*** se utilizan para revisar diámetros cilíndricos. Para una aplicación dada, generalmente se requiere un par de calibradores, uno de pasa y el otro de no

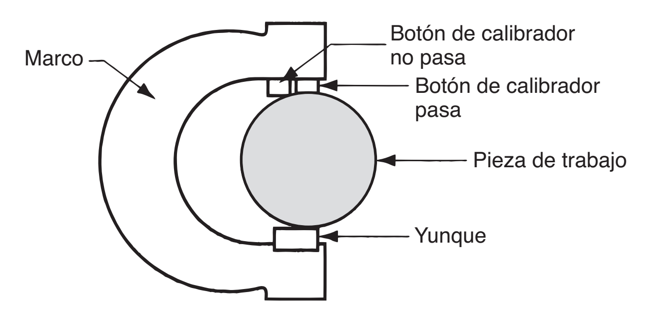


FIGURA 45.8 Calibrador de contacto para medir el diámetro de una pieza; la diferencia en altura de los botones pasa y no pasa está exagerada.

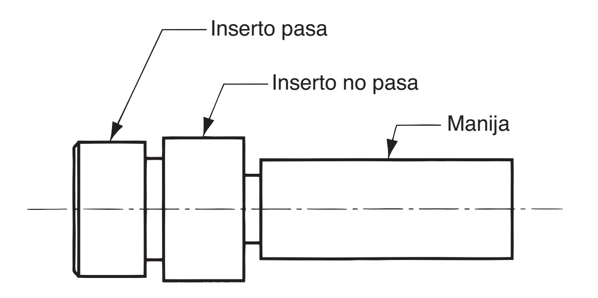


FIGURA 45.9 Calibrador de contacto; la diferencia en los diámetros de los insertos pasa y no pasa está exagerada.

pasa. Cada calibrador es un anillo cuya abertura se maquina a uno de los límites de tolerancia del diámetro de la pieza. Para facilidad de manejo, la parte exterior del anillo está moleteada. Los dos calibradores se distinguen por la presencia de un surco alrededor de la parte externa del anillo no pasa.

El calibrador límite más común que se utiliza para verificar diámetros de orificios es el ***calibrador de inserto***. El calibrador típico consiste en una manija a la cual se conectan dos piezas cilíndricas precisamente asentadas (insertos) de acero endurecido, como en la figura 45.9. Los insertos cilíndricos funcionan como los calibradores de pasa y no pasa. Otros dispositivos similares al calibrador de inserto incluyen los ***calibradores de ahusamiento***, que constan de un inserto ahusado para verificar orificios con ahusamiento; y los ***calibradores de rosca***, en los que el inserto está roscado para verificar las roscas internas en las piezas.

Los calibradores fijos son fáciles de usar y el tiempo requerido para completar una inspección casi siempre es menor al que emplea un instrumento de medición. Los calibradores fijos fueron un elemento fundamental en el desarrollo de la manufactura de piezas intercambiables (nota histórica 1.1). Proporcionaron un medio para fabricar piezas con tolerancias suficientemente estrechas para el ensamble sin limadura ni ajuste. Su desventaja es que se obtiene muy poca o ninguna información del tamaño real de la pieza; sólo indican si el tamaño está dentro de la tolerancia. En la actualidad, con la disponibilidad de instrumentos de medición electrónica de alta velocidad y la necesidad de control de proceso estadístico del tamaño de las piezas, el uso de los calibradores está dando paso gradualmente a instrumentos que proporcionen mediciones reales de las dimensiones de interés.

45.3.5 Mediciones angulares

Los ángulos se miden usando alguno de los diversos estilos de ***transportadores***. Un ***transportador simple*** consta de una hoja que se mueve como pivote en relación con una cabeza semicircular graduada en unidades angulares (por ejemplo, grados o radianes). Para usarlo, la hoja se gira a la posición que corresponde al ángulo de la pieza que se va a medir y éste se mide hacia adelante en escala angular. Un ***transportador con bisel,*** figura 45.10, tiene dos hojas rectas que funcionan como pivotes, una en relación con la otra. El ensamble de pivote tiene una escala de transportador que permite leer el ángulo formado por las hojas. Cuando está equipado con un vernier, el transportador con bisel puede leer alrededor de cinco minutos; sin un vernier, la resolución es de sólo un grado.

Cuando se usa una ***barra de seno***, como la que se ilustra en la figura 45.11, se obtiene una precisión más alta en las mediciones angulares. Una preparación posible consiste en un borde recto plano de acero (la barra de seno) y dos rodillos de precisión separados a una distancia conocida en la barra. El borde recto se alinea con el ángulo de la pieza que se medirá y se hacen bloques de calibración u otras mediciones lineales exactas para determinar la altura. El procedimiento se realiza en una placa superficial para obtener resultados más exactos. Esta altura H y longitud L de la barra de seno entre los rodillos se usan para calcular el ángulo A usando:

$$\text{sen } A = \frac{H}{L} \tag{45.2}$$

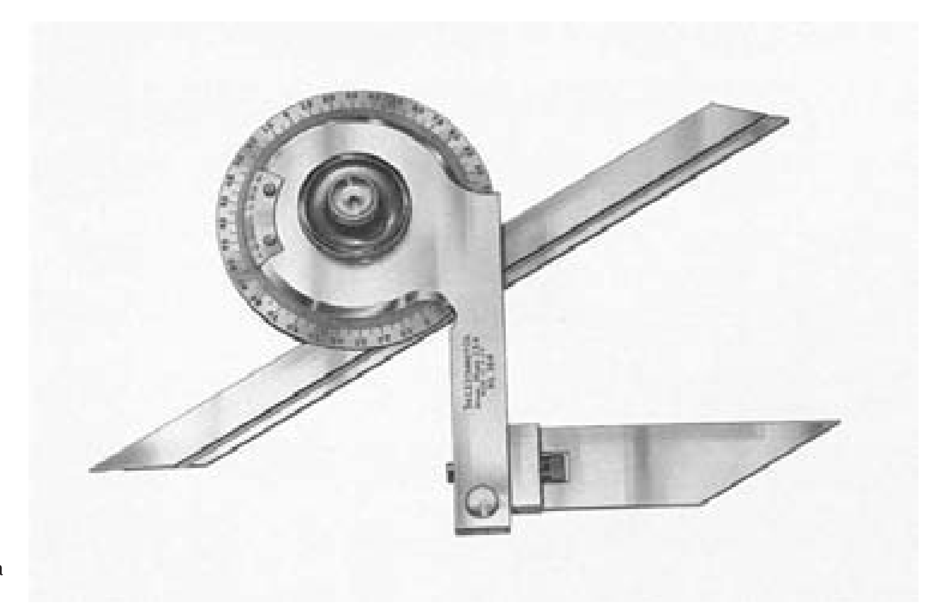


FIGURA 45.10 Transportador con bisel y escala de vernier. (Cortesía de L. S. Starrett Co.)

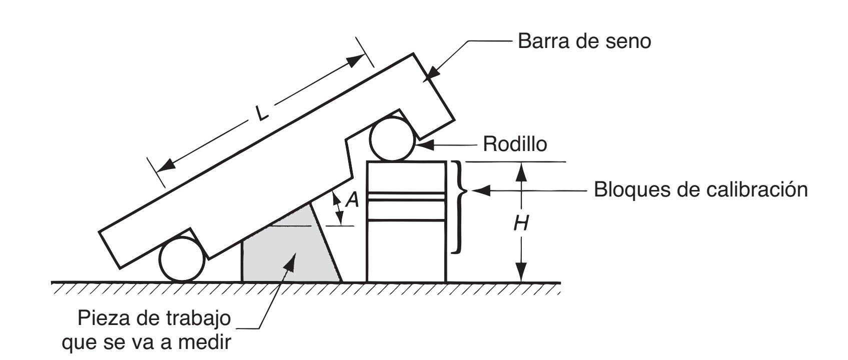


FIGURA 45.11 Preparación para usar una barra de seno.

45.4 MEDICIONES DE SUPERFICIES

En el capítulo 5 se describió que las superficies constan de dos parámetros: 1) textura de la superficie y 2) integridad de la superficie. La ***textura de la superficie*** se refiere a la configuración geométrica de la superficie y casi siempre se evalúa como ***rugosidad de la superficie*** (sección 5.2.2). La ***integridad de la superficie*** se refiere a las características materiales inmediatamente bajo la superficie y los cambios que ocurren en esta capa como resultado de los procesos de manufactura utilizados para crearla (sección 5.2.3.). En esta sección, se analizará la medición de estos dos parámetros.

45.4.1 Medición de la rugosidad de la superficie

Se usan diversos métodos para evaluar la rugosidad de la superficie. Se dividen en tres categorías: 1) comparación subjetiva con superficies de prueba estándar, 2) instrumentos electrónicos de aguja y 3) técnicas ópticas.

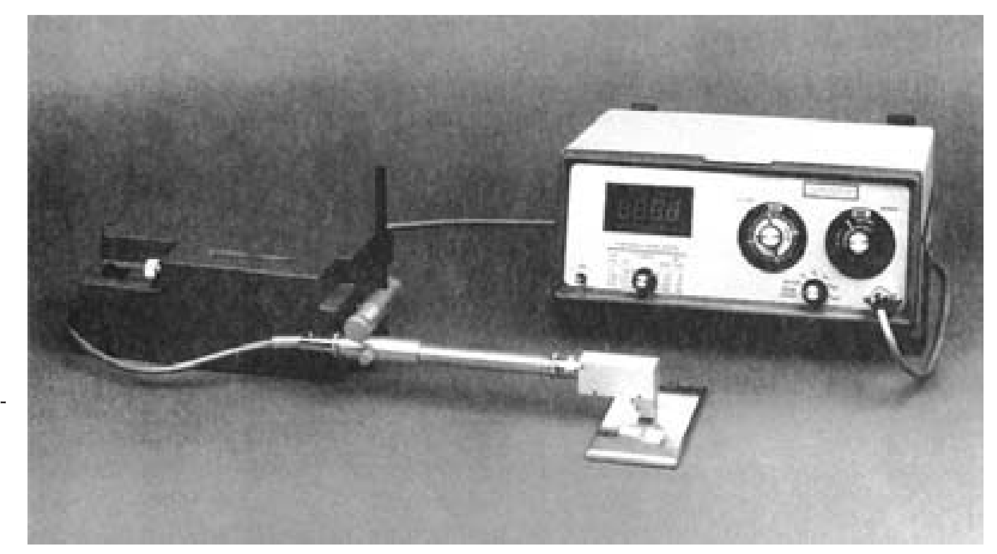


FIGURA 45.12 Instrumento tipo aguja para medir la rugosidad de la superficie (cortesía de Giddings & Lewis, Measurement Systems Division).

Superficies de prueba estándar Existen bloques estándar de acabado superficial, producidos para valores de rugosidad especificados.[1] Para estimar la rugosidad de un espécimen de prueba determinado, la superficie se compara con el estándar tanto en forma visual como mediante la "prueba de uña". En esta prueba, el usuario rasca suavemente las superficies del espécimen y el estándar, y determina qué estándar se acerca más al espécimen. Las superficies de prueba estándar son una forma conveniente para que un operador de máquinas obtenga un estimado de una rugosidad superficial. También son útiles para los ingenieros de diseño, con el propósito de juzgar qué valor de rugosidad de superficie debe especificar en el dibujo de una pieza.

Instrumentos de aguja La desventaja de la prueba de uña es su subjetividad. Existen a la venta otros instrumentos tipo punzón para medir la rugosidad superficial, similares a la prueba de uña, pero con un enfoque más científico. Un ejemplo es el perfilómetro, que se muestra en la figura 45.12. En estos dispositivos electrónicos, se mueve una aguja de diamante cónica, cuyo radio de punta mide alrededor de 0.005 mm (0.0002 in) y el ángulo en la punta es de 90°, a través de la superficie de prueba a una velocidad lenta constante. La operación se muestra en la figura 45.13. Conforme la cabeza de la aguja se mueve en forma horizontal, también se desplaza en forma vertical para seguir las desviaciones de la superficie. El movimiento vertical se convierte en una señal electrónica que representa la topografía de la superficie. Esto se despliega como: 1) un perfil de la superficie real o 2) un valor de rugosidad promedio. Los ***dispositivos para perfilar*** usan un plano separado como la referencia nominal contra la cual se miden las desviaciones. El resultado es una retícula del contorno de la superficie a lo largo de la línea que recorre la aguja. Este tipo de sistema identifica tanto la aspereza como la ondulación en la superficie de prueba. Los ***dispositivos para promediar*** reducen las desviaciones de rugosidad a un valor único R_a. Usan movimiento de correderas sobre la superficie real para establecer el plano de referencia nominal. Las correderas funcionan como un filtro mecánico para reducir el efecto de la ondulación en la superficie; en efecto, estos dispositivos para promediar realizan en forma electrónica los cálculos de la ecuación (5.1).

Técnicas ópticas La mayoría de los otros instrumentos de medición de superficies emplean técnicas ópticas para valorar la rugosidad. Estas técnicas se basan en la reflexión de la luz desde la superficie, la dispersión o difusión de la luz y la tecnología láser. Son útiles en aplicaciones donde no es conveniente el contacto del punzón con la superficie. Algunas de las técnicas permiten una velocidad de operación muy alta, por lo que posibilitan una

[1]En USCS, estos bloques tienen superficies con valores de rugosidad de 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 micropulgadas.

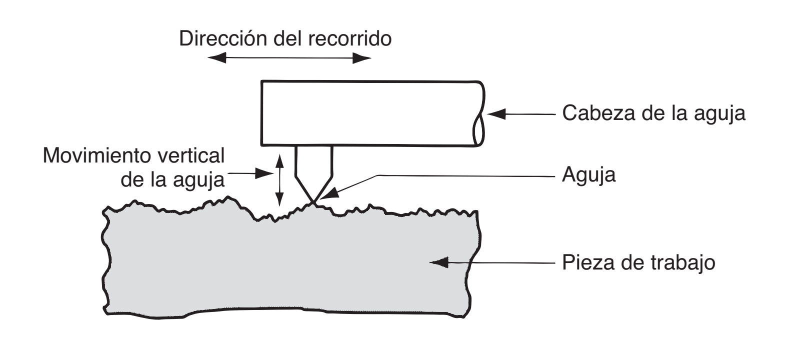


FIGURA 45.13 Bosquejo que muestra la operación de un instrumento tipo aguja. La cabeza de la aguja recorre en forma horizontal la superficie, mientras que la aguja se mueve en forma vertical para seguir el perfil de la superficie. El movimiento vertical se convierte en: 1) un perfil de la superficie o 2) el valor de la rugosidad promedio.

inspección al 100%. Sin embargo, las técnicas ópticas producen valores que no siempre se correlacionan bien con las mediciones de rugosidad hechas con instrumentos tipo aguja.

45.4.2 Evaluación de la integridad de la superficie

La integridad de la superficie es más difícil de valorar que la rugosidad de la superficie. Algunas de las técnicas para inspeccionar los cambios de la subsuperficie destruyen el espécimen de material. Entre las técnicas de evaluación para la integridad de la superficie están las siguientes:

- ***Textura de la superficie***. La rugosidad de la superficie, la descripción de la capa y otras medidas proporcionan datos superficiales sobre la integridad de la superficie. Este tipo de prueba es relativamente simple de realizar y siempre se incluye en la evaluación de la integridad de la superficie.
- ***Examen visual***. El examen visual revela diversos defectos superficiales como resquebrajaduras, cráteres, pliegues y arrugas. Este tipo de evaluación se amplifica con frecuencia mediante técnicas fluorescentes y fotográficas.
- ***Examen microestructural***. Esto implica técnicas metalográficas estándar para preparar secciones transversales y obtener fotomicrografías en las que se examina la microestructura de las capas superficiales, comparadas con el sustrato.
- ***Perfil de microdureza***. Las diferencias de dureza cerca de la superficie se detectan usando técnicas de medición de microdureza, como la de Knoop y Vickers (sección 3.2.1). Se secciona la pieza y se hace una gráfica de la dureza contra la distancia bajo la superficie para obtener un perfil de dureza de la sección transversal.
- ***Perfil de esfuerzo residual***. Se emplean técnicas de difracción de rayos X para medir los esfuerzos residuales en las capas de la superficie de una pieza.

45.5 TECNOLOGÍAS AVANZADAS DE MEDICIÓN E INSPECCIÓN

Las tecnologías avanzadas están sustituyendo a las técnicas manuales de medición y calibración en las plantas de manufactura modernas. Incluyen métodos de detección con contacto y sin contacto. En esta sección se analizan: 1) las máquinas de medición de coordenadas, 2) los láseres, 3) la visión de máquina y 4) otras técnicas sin contacto.

45.5.1 Máquinas de medición de coordenadas

Una ***máquina de medición de coordenadas*** (CMM, por sus siglas en inglés) consta de una sonda de contacto (palpador) y un mecanismo para posicionar la sonda en tres dimensiones



FIGURA 45.14
Máquina de medición de coordenadas (cortesía de Brown & Sharpe Manufacturing Company).

relativas a las superficies y características de la pieza de trabajo, véase la figura 45.14. Las coordenadas de localización de la sonda se registran con exactitud, conforme ésta hace contacto con la superficie de la pieza para obtener datos de su configuración geométrica.

Construcción y operación de una CMM En una CMM, la sonda se sujeta a una estructura que permite su movimiento en relación con la pieza, la cual se fija en una mesa de trabajo conectada a la estructura. La estructura debe ser rígida para minimizar las deflexiones que contribuyen a los errores de medición. La máquina en la figura 45.14 tiene una estructura de puente, uno de los diseños más comunes. Se usan características especiales en las estructuras de las CMM para lograr una alta exactitud y precisión en la máquina de medición, incluyendo el uso de cojinetes de aire de baja fricción y aislamiento mecánico de la CMM para reducir vibraciones. Un aspecto importante en una CMM es la sonda de contacto y su operación. Las sondas modernas "de gatillo de contacto" tienen un contacto eléctrico sensible que emite una señal cuando la sonda se desplaza de su posición neutral una mínima cantidad. Al hacer contacto, el controlador de la CMM registra las posiciones de coordenadas y hace un ajuste para el exceso de desplazamiento y el tamaño de la sonda.

El posicionamiento de la sonda en relación con la pieza se realiza en forma manual o bajo el control de una computadora. Los métodos para operar una CMM se clasifican [13] como: 1) control manual, 2) manual asistido por computadora, 3) motorizado asistido por computadora y 4) control directo por computadora.

En el ***control manual***, un operador mueve físicamente la sonda a lo largo de los ejes para hacer contacto con la pieza y registrar las mediciones. La sonda flota libremente para facilitar el movimiento. Las mediciones se indican mediante lectura digital y el operador puede registrarlas en forma manual o automática (impresión en papel). El operador debe realizar los cálculos trigonométricos. Una CMM ***manual asistida por computadora*** es capaz de procesar datos de computadora para realizar estos cálculos. Los tipos de cálculos incluyen la conversión simple de USCS a SI, determinar el ángulo entre dos planos y determinar las ubicaciones de los centros de los orificios. La sonda todavía flota libremente para permitir que el operador la ponga en contacto con las superficies de las piezas.

Las CMM ***motorizadas asistidas por computadora*** usan corriente para mover la sonda a lo largo del eje de la máquina bajo la guía de un operador. Se usa un bastón de mando o un dispositivo similar para controlar el movimiento. Para reducir los efectos de las colisiones entre la sonda y la pieza se emplean motores de engranes de baja corriente y embragues de fricción. La CMM de ***control directo por computadora*** opera igual que una máquina herramienta de CNC. Es una máquina de inspección computarizada que funciona bajo el control de un programa. La computadora también registra las mediciones hechas durante la inspección y ejecuta diversos cálculos asociados con ciertas mediciones (por ejemplo, calcular el centro de un orificio a partir de tres puntos en la superficie del orificio ciego).

Mediciones y ventajas de una CMM La capacidad básica de una CMM es determinar los valores de coordenadas donde su sonda entra en contacto con la superficie de una pieza. El control por computadora permite a la CMM realizar mediciones e inspecciones más sofisticadas, como: 1) determinar la posición central de un orificio o cilindro, 2) definir un plano, 3) medir la planicie de una superficie o el paralelismo entre dos superficies y 4) medir un ángulo entre dos planos.

Entre las ventajas de usar máquinas de medición de coordenadas sobre los métodos de inspección manuales están 1) la mayor productividad, una CMM realiza procedimientos de inspección más complejos en mucho menos tiempo que los métodos manuales tradicionales; 2) mayor exactitud y precisión inherentes que los métodos convencionales; y 3) menores errores humanos mediante la automatización del procedimiento de inspección y cálculos asociados [13]. Una CMM es una máquina de propósito general que se usa para inspeccionar diversas configuraciones de piezas.

45.5.2 Mediciones con láseres

Recuerde que láser significa amplificación luminosa mediante la emisión estimulada de radiaciones. Entre las aplicaciones del láser están el corte (sección 26.3.3) y la soldadura (sección 31.4.2). Estas aplicaciones implican el uso de láser de estado sólido capaz de enfocar suficiente energía para fundir o sublimar el material de trabajo. Los láseres para aplicaciones de medición son láser de gas de baja energía, como la combinación helio-neón, que emite luz en el rango visible. El haz luminoso de un láser es: 1) altamente monocromático, esto significa que la luz tiene una sola longitud de onda y 2) posee una alta colimación, lo que significa que los haces de luz son paralelos. Estas propiedades han motivado una creciente lista de aplicaciones del láser en la medición e inspección. A continuación se describen dos de éstas.

Sistemas láser de exploración El láser de exploración usa un haz láser distorsionado mediante un espejo rotatorio para producir un haz de luz que pasa sobre un objeto, como

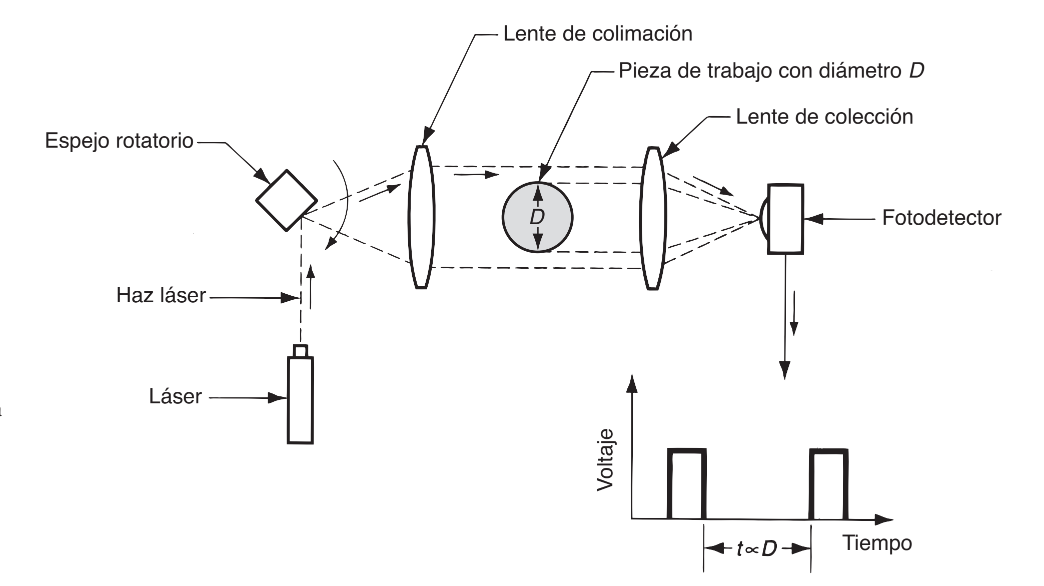


FIGURA 45.15 Sistema láser de exploración para medición del diámetro de una pieza de trabajo cilíndrica; el tiempo de interrupción del haz de luz es proporcional al diámetro *D*.

en la figura 45.15. Un fotodetector en el lado lejano del objeto detecta el haz de luz durante su paso, excepto por breve tiempo cuando éste es interrumpido por el objeto. Este periodo puede medirse rápidamente con gran exactitud. Un sistema microprocesador mide la interrupción de tiempo, la cual se relaciona con el tamaño del objeto en la trayectoria del haz láser y convierte ese tiempo a una dimensión lineal. Los haces de láser de exploración se aplican en la inspección y calibración en líneas de alta producción. Pueden enviarse señales al equipo de producción para hacer ajustes en el proceso y activar un dispositivo de clasificación en la línea de producción. Entre las aplicaciones de los sistemas láser de exploración están las operaciones de laminado, la extrusión de alambres, el maquinado y el esmerilado.

Triangulación con láser La triangulación se usa para determinar la distancia de un objeto a partir de dos posiciones conocidas mediante relaciones trigonométricas de un triángulo recto. El principio puede aplicarse en mediciones dimensionales usando un sistema láser, como en la figura 45.16. El haz láser se enfoca sobre un objeto para formar un punto de luz en la superficie. Para determinar la ubicación del punto se emplea un detector óptico. Se

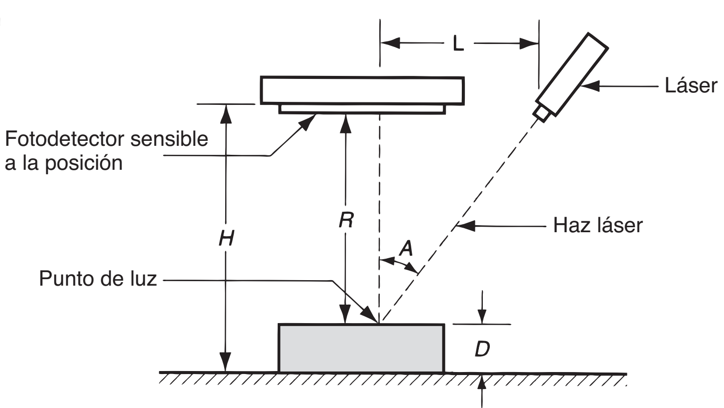


FIGURA 45.16 Triangulación láser para medir una dimensión de la pieza *D*.

fijan y registran el ángulo A del haz dirigido al objeto y la distancia H. Dado que el fotodetector se localiza a una distancia fija encima de la mesa de trabajo, la profundidad de la pieza D en la disposición de la figura 45.16 está dada por

$$D = H - R = H - L \cot A \tag{45.3}$$

donde L se determina mediante la posición del punto de luz sobre la pieza de trabajo.

45.5.3 Visión de máquina

La ***visión de máquina*** implica la adquisición, procesamiento e interpretación de datos de imágenes mediante computadoras para alguna aplicación útil. Los sistemas de visión se clasifican en dos y tres dimensiones. Los sistemas de dos dimensiones captan la escena como una imagen bidimensional, lo cual es bastante conveniente para aplicaciones que implican un objeto plano. Entre los ejemplos están la medición y la calibración de dimensiones, la presencia de componentes y características de una superficie plana (o casi plana). Los sistemas de visión tridimensional se requieren para aplicaciones que necesitan un análisis tridimensional de la escena, los cuales implican contornos o formas. La mayoría de las aplicaciones actuales son bidimensionales, por lo que el análisis de esta sección se enfocará en esta tecnología.

Operación de los sistemas de visión de máquinas La operación de un sistema de visión de máquina consta de tres pasos, que se muestran en la figura 45.17: 1) adquisición y digitalización de la imagen, 2) procesamiento y análisis de la imagen y 3) interpretación.

La adquisición y digitalización de imágenes se realizan mediante una cámara de video conectada a un sistema de digitalización para almacenar los datos de imágenes que se utilizarán en el procesamiento posterior. Con la cámara enfocada en el sujeto, se obtiene una imagen que divide el área de visión en una matriz de elementos separados de la fotografía (llamados ***pixeles***), en la cual cada elemento supone un valor proporcional a la intensidad de luz de esa porción de la escena. El valor de intensidad para cada pixel se convierte a su valor digital equivalente mediante una conversión analógica a digital. La adquisición y digitalización de imágenes se muestran en la figura 45.18 para un sistema de ***visión binaria***; en éste la intensidad de la luz se reduce a dos valores (blanco o negro = 0 o 1), como en la tabla 45.1. La matriz de pixeles de la ilustración sólo es de 12 × 12; un sistema de visión real debe tener muchos más pixeles para una mejor resolución. Cada conjunto de valores de pixeles es un ***marco***, el cual consiste en el conjunto de pixeles digitalizados. El

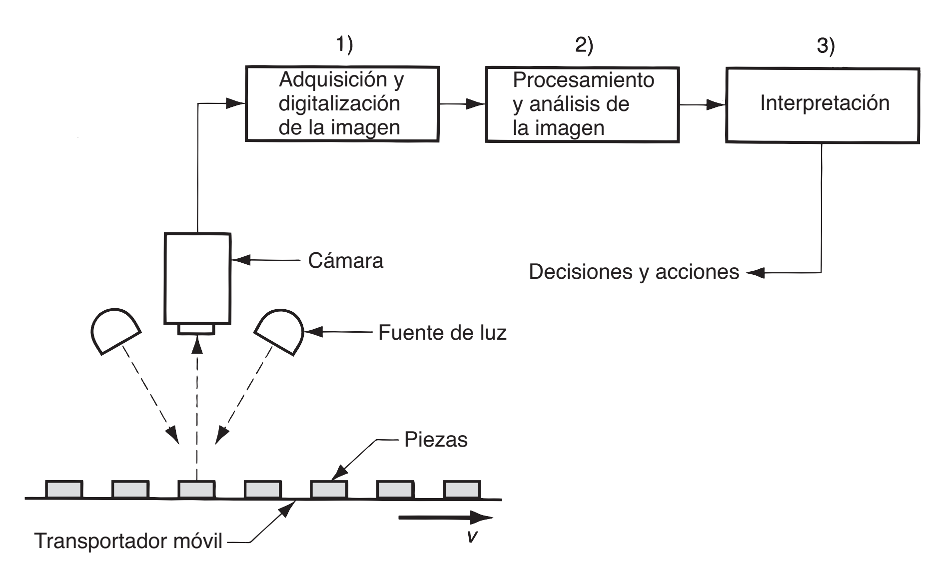
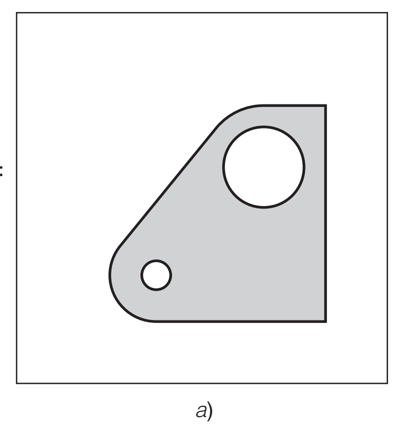
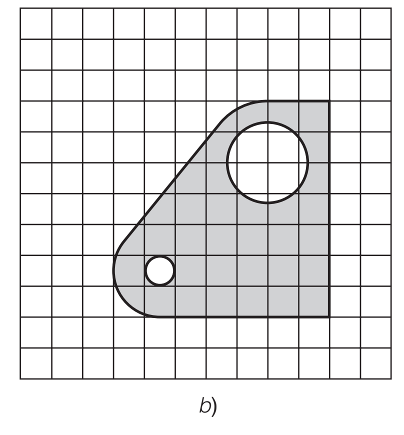


FIGURA 45.17 Operación de un sistema de visión de máquina.





a) *b*)

FIGURA 45.18 Adquisición y digitalización de la imagen: *a*) la escena consiste en una parte de color oscuro en contraste con un fondo claro; *b*) una matriz de 12 × 12 pixeles impuesta sobre la escena.

marco se almacena en la memoria de la computadora. El proceso de leer todos los valores de pixeles en un marco se realiza 30 veces por segundo en Estados Unidos y 25 ciclos/s en los sistemas europeos.

La ***resolución*** de un sistema de visión es su capacidad para detectar detalles y características finos en la imagen. Esto depende de la cantidad de pixeles que se usan. Los arreglos de pixeles comunes tienen 256 × 256, 512 × 512 o 1 024 × 1 024 elementos de fotografía. Entre más pixeles tenga el sistema de visión, mayor es su resolución. Sin embargo, el costo del sistema aumenta conforme lo hace la cuenta de pixeles. Asimismo, el tiempo requerido para leer los elementos de la fotografía y procesar los datos aumenta con una cantidad de pixeles mayor. Además de los sistemas de visión binarios, los sistemas de visión más sofisticados distinguen varios niveles de grises en la imagen, esto les permite determinar características de la superficie, como las texturas. Estos sistemas, llamados ***visión con escala de grises***, típicamente usan cuatro, seis u ocho bits de memoria. Otros sistemas de visión pueden reconocer colores.

La segunda función en la visión de máquina es el ***procesamiento* y *análisis de la imagen***. Deben analizarse los datos para cada marco dentro del tiempo requerido con el fin de completar una exploración (1/30 s o 1/25 s). Se han invertido varias técnicas para analizar datos de imágenes, incluyendo detección de bordes y extracción de características. La ***detección de bordes*** implica determinar las ubicaciones de los límites entre un objeto y sus alrededores. Esto se realiza identificando el contraste en la intensidad de la luz entre los pixeles adyacentes en las orillas del objeto. En la ***extracción de características*** se determinan los valores característicos de una imagen. Muchos sistemas de visión de máquina identifican un objeto en la imagen mediante sus características; algunos de ellos son el área, la longitud, el ancho o el diámetro del objeto, el perímetro, el centro de gravedad y

TABLA 45.1 Valores de pixeles en un sistema de visión binario para la imagen de la figura 45.18.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

la relación de dimensión. Se han diseñado algoritmos de extracción de características para determinarlas con base en el área y los límites de los objetos. El área de un objeto se determina contando la cantidad de pixeles que lo forman. La longitud se encuentra midiendo la distancia (en pixeles) entre dos bordes opuestos de la pieza.

La ***interpretación*** de la imagen es la tercera función. Se realiza mediante características extraídas. Por lo general la interpretación tiene que ver con el reconocimiento de objetos, identificar el objeto en la imagen, comparándolo con modelos predefinidos o valores estándar. Una técnica de interpretación común es la ***coincidencia de plantillas***, que se refiere a métodos que comparan una o más características de una imagen con las características correspondientes de un modelo (plantilla) almacenado en la memoria de la computadora.

Aplicaciones de la visión de máquina En general, la función de interpretación en la visión de máquina se relaciona con las aplicaciones, las cuales se dividen en cuatro categorías: 1) inspección, 2) identificación de piezas, 3) guía y control visual y 4) monitoreo de seguridad.

La ***inspección*** es la categoría más importante, representa alrededor del 90% de todas las aplicaciones industriales. Las aplicaciones están en la producción masiva, en donde el tiempo para programar e instalar el programa se divide entre muchos miles de unidades. Entre las tareas de inspección típicas están: 1) ***medición o calibración de dimensiones***, la cual implica medir o calibrar ciertas dimensiones de piezas o productos que se mueven a lo largo de un transportador; 2) ***funciones de verificación***, las cuales incluyen verificar la presencia de componentes en un producto ensamblado, la presencia de un orificio en una pieza de trabajo y tareas similares; y 3) ***identificación de fallas y defectos***, como la identificación de los defectos en una etiqueta impresa, por ejemplo una ubicación errónea, texto, numeración o imágenes mal impresas en la etiqueta.

Las aplicaciones de la ***identificación de piezas*** incluyen el conteo de las diferentes piezas que se mueven a lo largo de un transportador, la clasificación de piezas y el reconocimiento de caracteres. La ***guía y el control visual*** implica un sistema de visión que hace interfaz con un robot o máquina similar para controlar el movimiento de la máquina. Entre los ejemplos se cuentan el seguimiento de la costura en la soldadura continua con arco, el posicionamiento o la reorientación de piezas y la recolección de piezas de un contenedor. En las aplicaciones de ***monitoreo de seguridad***, el sistema de visión supervisa la operación de producción para detectar irregularidades que podrían indicar una condición de riesgo para el equipo o las personas.

45.5.4 Otras técnicas de inspección sin contacto

Además de los métodos de inspección óptica, se usan diversas técnicas no ópticas en la inspección. Éstas incluyen las técnicas de sensores basados en campos eléctricos, radiaciones y ultrasonido.

Bajo ciertas condiciones, los ***campos eléctricos*** creados mediante una sonda eléctrica se emplean para la inspección. Los campos incluyen la reluctancia, la capacitancia y la inductancia: son afectados por un objeto en la vecindad de la sonda. En una aplicación típica, la pieza de trabajo se posiciona en una relación fija con la sonda. Al medir el efecto del objeto sobre el campo eléctrico, se hace una medición indirecta de ciertas características de las piezas, como las dimensiones, el grosor de láminas metálicas y defectos (resquebrajaduras y huecos bajo la superficie) en el material.

Las ***técnicas de radiación*** emplean radiación de rayos X para inspeccionar metales y soldaduras. La cantidad de radiación que absorbe el objeto metálico indica el espesor y la presencia de defectos en la pieza o sección soldada. Por ejemplo, se usa la inspección con rayos X para medir el espesor de hojas metálicas en el laminado. Los datos de la inspección se emplean para ajustar la separación entre los rodillos en la laminadora.

Las ***técnicas ultrasónicas*** usan sonido de alta frecuencia (mayor de 20 000 Hz) para realizar varias tareas de inspección. Una de las técnicas analiza las ondas ultrasónicas que

emite una sonda y que se reflejan en el objeto. Durante la preparación para el procedimiento de inspección, se coloca una pieza de prueba ideal frente a la sonda para obtener un patrón del sonido reflejado. Se emplea este patrón de sonido como el estándar contra el cual se comparan después las pieza de la producción. Si el patrón reflejado de una pieza coincide con el estándar, se acepta la pieza. Si no coincide, se rechaza.

REFERENCIAS

[1] American National Standards Institute, Inc. ***Surface Texture,*** ANSI B46.1-1978. American Society of Mechanical Engineers, Nueva York, 1978.

[2] American National Standards Institute, Inc. ***Surface Integrity***, ANSI B211.1-1986, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1986.

[3] Brown y Sharpe. ***Handbook of Metrology.*** North Kingston, R.I., 1992.

[4] ***Centuries of Measurement.*** Sheffield Measurement Division, Cross & Trecker Corporation, Dayton, Ohio, 1984.

[5] DeGarmo, E. P. Black, J. T. y Kohser, R. A. ***Materials and Processes in Manufacturing***, 9a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.

[6] Farago, F. T. ***Handbook of Dimensional Measurement***, 3a. ed., Industrial Press Inc,. Nueva York, 1994.

[7] ***Machining Data Handbook***, 3a. ed., Vol. dos. Machinability Data Center. Cincinnati, Ohio, 1980, capítulo 18.

[8] Morris, A. S. ***Measurement and Calibration for Quality Assurance.*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1998.

[9] Mummery, L. ***Surface Texture Analysis—The Handbook.*** Hommelwerke Gmbh, Alemania, 1990.

[10] Murphy, S. D. ***In-Process Measurement and Control.*** Marcel Dekker, Nueva York, 1990.

[11] Ostwald, P. F. y Munoz. J. ***Manufacturing Processes and Systems***, 9a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1997.

[12] Schaffer, G. H. "Taking the Measure of CMMs." Reporte especial 749, ***American Machinist,*** octubre de 1982, pp. 145-160.

[13] Schaffer, G. H. "Machine Vision: A Sense for CIM." Reporte especial 767, ***American Machinist***, junio de 1984, pp. 101-120.

[14] Spitler, D. (ed.). ***Fundamentals of Tool Design,*** 5a. ed. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 2003

[15] S. Starrett Company, ***Tools and Rules,*** Athol, Mass., 1992.

[16] Wick, C. y Veilleux, R. E. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., vol. IV, ***Quality Control and Assembly.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1987.

PREGUNTAS DE REPASO

45.1. ¿Cómo se distingue la medición de la inspección?

45.2. ¿Cuáles son las diferencias entre la calibración y la medición?

45.3. ¿Cuáles son las seis cantidades fundamentales en la metrología?

45.4. ¿Que es la exactitud en la medición?

45.5. ¿Qué es la precisión en la medición?

45.6. ¿Qué significa el término "calibración"?

45.7. Además de una buena exactitud y precisión, ¿cuáles son los atributos y características deseables de un instrumento de medición?

45.8. ¿Qué es la regla de 10?

45.9. La inspección automatizada puede integrarse con el proceso de manufactura para realizar ciertas acciones. ¿Cuáles son estas posibles acciones?

45.10. Proporcione un ejemplo de una técnica de inspección sin contacto.

45.11. ¿Qué significa el término "dispositivo de medición graduado"?

45.12. ¿Cuáles son los métodos comunes para evaluar la rugosidad de la superficie?

45.13. ¿Qué es una máquina de medición de coordenadas?

45.14. Describa un sistema láser de exploración.

45.15. ¿Qué es un sistema de visión binaria?

45.16. Mencione algunas de las tecnologías de sensores no ópticos sin contacto, disponibles para inspección.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 16 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

45.1. ¿Cuáles de los siguientes son atributos del "sistema métrico" de medición lineal? (dos respuestas correctas): *a*) basado en distancias astronómicas, *b*) definido en términos del cuerpo humano, *c*) se origino en Gran Bretaña, *d*) usa prefijos racionales para las unidades y *e*) las unidades se subdividen en forma decimal.

45.2. ¿Cuál de los siguientes países no utiliza el sistema internacional de unidades?: *a*) China, *b*) Francia, *c*) Alemania, *d*) Japón, *e*) Panamá, *f*) Rusia o *g*) Estados Unidos.

45.3. Los dos tipos básicos de inspección son la inspección por variables y la inspección por atributos. ¿Cuál de las siguientes opciones la usa el segundo tipo de inspecciones?: *a*) prueba destructiva, *b*) calibración, *c*) medición o *d*) prueba no destructiva.

45.4. ¿Cuál de las siguientes opciones puede lograrse al integrar la inspección 100% automatizada con el proceso de manufactura?: (dos mejores respuestas) *a*) mejor diseño de productos, *b*) retroalimentación de datos para ajustar el proceso, *c*) calidad perfecta al 100% y *d*) clasificación de las piezas con y sin defectos.

45.5. ¿Cuáles de los siguientes son ejemplos de inspección sin contacto? (dos respuestas correctas): *a*) calibradores, *b*) sistemas de medición de coordenadas, *c*) indicadores de carátula, *d*) visión de máquina, *e*) micrómetros, *f*) sistemas láser de exploración, *g*) calibradores de contacto y *h*) técnicas ultrasónicas.

45.6. ¿Con cuál de los siguientes materiales es más común que se haga una placa superficial?: *a*) cerámico de óxido de aluminio, *b*) hierro fundido, *c*) granito, *d*) polímeros duros o *e*) acero inoxidable.

45.7. ¿En cuál de las siguientes mediciones sería apropiado un micrómetro externo?: (dos mejores respuestas) *a*) profundidad de un orificio, *b*) diámetro de un orificio, *c*) longitud de una pieza, *d*) diámetro de un eje y *e*) rugosidad de una superficie.

45.8. En un calibrador pasa/no pasa, ¿cuál de las siguientes opciones describe mejor la función del calibrador de pasa?: *a*) verifica el límite de tolerancia máxima, *b*) verifica la condición de material máxima, *c*) verifica el tamaño máximo, *d*) verifica la condición material mínima o *e*) verifica el tamaño mínimo.

45.9. ¿Cuál de las siguientes opciones es probable que sea un calibrador pasa/no pasa?: (tres respuestas correctas) *a*) bloques de calibración, *b*) calibrador límite, *c*) calibrador maestro, *d*) calibrador de inserto, y *e*) calibrador de contacto.

45.10. ¿Cuál de las siguientes es la aplicación más importante de los sistemas de visión?: *a*) inspección, *b*) identificación de objetos, *c*) monitoreo de seguridad o *d*) guía y control visual de un manipulador robótico.

PROBLEMAS

Principios de medición

45.1. Se usan dos micrómetros para medir un bloque de calibración de 1.0000 in. Se toman cinco mediciones con cada micrómetro. Para el micrómetro A las cinco mediciones fueron 1.0001 in, 1.0003 in, 1.0000 in, 1.0001 in y 1.0003 in. Para el micrómetro B, las cinco mediciones fueron 1.0002 in, 0.9999 in, 1.0001 in, 1.0000 in y 0.9999 in. Determine *a*) la media y la desviación estándar del error para cada uno de los micrómetros, *b*) ¿cuál micrómetro tiene la mejor exactitud?, *c*) ¿cuál micrómetro tiene la mejor precisión?

45.2. Se usan dos calibradores de vernier para medir un bloque de calibración de 10.000 mm. Se toman cinco mediciones con cada calibrador. Para el calibrador A las cinco mediciones fueron 10.01 mm, 10.00 mm, 10.02 mm, 10.02 mm y 10.01 mm. Para el calibrador B, las cinco mediciones fueron 10.01 mm, 9.98 mm, 9.98 mm, 10.01 mm y 9.99 mm. Determine *a*) la media y la desviación estándar del error para cada uno de los calibradores, *b*) ¿cuál calibrador tiene la mejor exactitud?, *c*) ¿cuál calibrador tiene la mejor precisión?

Dispositivos de medición e inspección

45.3. Diseñe los tamaños nominales de un calibrador de inserto pasa/no pasa para inspeccionar una pieza de 1.500 ± 0.030 in. Existe una holgura de desgaste aplicada sólo al lado pasa del calibrador. La holgura de desgaste es 2% de la banda de tolerancia completa para la característica inspeccionada. Determine *a*) el tamaño nominal del calibrador pasa incluyendo la holgura de desgaste y *b*) el tamaño nominal del calibrador no pasa.

45.4. Resuelva el problema anterior, excepto que el calibrador pasa/no pasa se usa para inspeccionar el diámetro de una flecha que es de 1.500 ± 0.030. Se aplica una holgura de desgaste sólo al lado pasa.

45.5. Diseñe los tamaños nominales de un calibrador de inserto pasa/no pasa para inspeccionar una pieza de 30.00 ± 0.18 mm. Existe una holgura de desgaste aplicada sólo al lado pasa del calibrador. La holgura de desgaste es 3% de la banda de tolerancia completa para la característica inspeccionada. Determine *a*) el tamaño nominal del calibrador pasa incluyendo la holgura de desgaste y *b*) el tamaño nominal del calibrador no pasa.

45.6. Resuelva el problema anterior, excepto que el calibrador pasa/no pasa se usa para inspeccionar el diámetro de una flecha que es de 30.00 ± 0.18 mm. Se aplica una holgura de desgaste sólo al lado pasa.

45.7. Se usa una barra de seno para determinar el ángulo de una característica de una pieza. La longitud de la barra de seno es de 6.000 in. Los rodillos tienen un diámetro de 1.000 in. Toda la inspección se realiza sobre una placa superficial. Con el fin de que la barra de seno coincida con el ángulo de la pieza, deben apilarse los siguientes bloques de calibración: 2.0000, 0.5000, 0.3550. Determine el ángulo de la característica de la pieza.

45.8. Se usa una barra de seno de 200.00 mm para inspeccionar un ángulo en una pieza. El ángulo tiene una dimensión de 35.0 ± 1.8°. Los rodillos de la barra de seno tienen un diámetro de 30.0 mm. Se cuenta con un conjunto de bloques de calibración que pueden formar cualquier altura desde 10.0000 hasta 199.9975 en incrementos de 0.0025 mm. Determine *a*) la altura de la pila de bloques de calibración para inspeccionar el ángulo mínimo, *b*) la altura de la pila de bloques de calibración para inspeccionar el ángulo máximo, *c*) el incremento más pequeño de ángulo que puede establecerse al tamaño nominal de ángulo. Toda la inspección se realiza sobre una placa superficial.

45.9. Un sistema de triangulación láser tiene el rayo montado a 35° de la vertical. La distancia entra la mesa de trabajo y el fotodetector es de 24.000 in. Determine *a*) la distancia entre el láser y el fotodetector cuando no está presente una pieza y *b*) la altura de una pieza cuando la distancia entre el láser y el fotodetector es de 12.0250 in.

45.10. Un sistema de triangulación láser se usa para determinar la altura de un bloque de acero. El sistema tiene un detector fotosensible que se localiza a 750.000 mm sobre la superficie de trabajo, y el láser está montado a un ángulo de 30° de la vertical. La posición de la reflexión del láser sobre el fotosensor se registra sin ninguna pieza sobre la mesa de trabajo. Después se coloca una pieza sobre la mesa de trabajo, la reflexión del láser cambia 70.000 mm hacia el láser. Determine la altura del objeto.



ÍNDICE